

Katedra matematické analýzy
Přírodovědecká fakulta
Masarykova univerzita v Brně

**ZÁKLADY
MATEMATICKÉ ANALÝZY
V REÁLNÉM OBORU**

Úvod

V průběhu školního roku 2002/03 byly na sekci matematika přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně zahájeny práce na přípravě studijních materiálů pro distanční studium ve studijních programech Obecná matematika a Aplikovaná matematika. Cílem bylo zabezpečit jednotlivé kurzy studijními materiály v elektronické podobě. Předkládaný text, orientovaný na základní kurz matematické analýzy, je první verzí takového materiálu.

Obsahem tohoto textu je učivo prvních obvykle tří semestrů studia matematické analýzy v reálném oboru. Konkrétněji, v celkem 6-ti částech je věnován podrobnému výkladu těchto tematických okruhů: I. Diferenciální počet funkcí jedné reálné proměnné, II. Integrální počet funkcí jedné reálné proměnné, III. Nekonečné řady, IV. Diferenciální počet funkcí n reálných proměnných, V. Integrální počet funkcí n reálných proměnných a VI. Diferenciální rovnice. Každá z těchto částí je dělena do kapitol (celkem 18) a každá kapitola, mimo kapitoly obsahující doplňky, je uzavřena blokem standardních cvičení s výsledky a kontrolními otázkami. Text je průběžně doprovázen ilustrativními řešenými příklady a to jak standardními, tak příp. klíčovými – hrajícími důležitou roli v příslušné teorii. Doplňky přirozeným způsobem rozšiřují a prohlubují tematiku příslušné kapitoly.

Vzhledem k velkému rozsahu a značné obsažnosti témat (stačí srovnat rozsah předloženého materiálu se součtem rozsahů textů obvykle využívaných při studiu v jednotlivých okruzích) byl pro zvládnutí první fáze úkolu zvolen přístup co největší koncentrace presentované látky. Tomu byly podrobeny i metody „úsporné“ výstavby příslušných partií. Ve druhé a příp. dalších verzích bude tento text dále doplňován – prohlubován a rozšiřován o metodické poznámky, jiné přístupy, další doplňky, ilustrativní grafy a příp. odkazy na matematický software tak, aby co nejlépe vyhověl cíli – samostatnému studiu zájemců.

Strohý sloh textu je soustředěn na definice pojmů, studium jejich základní vlastnosti, vztah nově definovaných pojmů k předchozím (taková tvrzení jsou uvedena ve formě matematických vět a jejich důsledků - téměř všechny jsou do-

kázány, u zbývajících je alespoň naznačena hlavní myšlenka důkazu s odkazem, kde lze podrobný důkaz nalézt) a aplikace. Stručnosti je podřízen i metodický přístup a koncepce textu. Výklad je volen tak, aby čtenáři dovolil co nejprímější postup. Text je průběžně doplňován poznámkami a ilustrativními příklady s komentáři. Veškeré definice, věty, důsledky, příklady i poznámky jsou samostatně označeny trojicí čísel, z nichž první je pořadovým číslem kapitoly, další pořadovým číslem paragrafu a poslední pořadovým číslem příslušného tvrzení v daném paragrafu. S pomocí takto jednoznačně přiřazené polohy tvrzení v textu jsou pak popsány odkazy, které v hypertextové variantě dovolují poklepnem na barevně odlišené souřadnice odkazu – odskok na citované tvrzení.

Pro zvládnutí tematiky se vychází (vzhledem k širokému spektru možností středoškolského studia možných zájemců) z průměrné znalosti základů středoškolské matematiky. V průběhu studia se předpokládá průběžná elektronická korespondence studujícího s učitelem a jejich osobní setkávání na pravidelných půldenních konzultacích (1× měsíčně) a 3-denním semestrálním soustředění. Při takových příležitostech bude zájemcům doporučen postup pro používání tohoto textu, konzultovány nejasnosti a případně presentovány i další vhodné a aktuálně dostupné zdroje základů matematické analýzy.

Z výše uvedených důvodů, může být tento text užitečný i pro studenty prezenční a kombinované formy studia uvedených studijních programů a obecně dalších studijních programů obsahujících základy matematické analýzy.

V této fázi práce jsou si autoři vědomi řady ještě neodstraněných nedostatků. Mezi jiným s podrobnou jazykovou, metodickou a obsahovou korekturou se počítá u modifikované druhé verze. Proto uvítáme upozornění na veškeré překlepy a jiné nejen technické nedostatky, které v této verzi textu přes pečlivé čtení jistě zůstaly.

S přáním užitečnosti předkládaného textu

pospasil@math.muni.cz

puza@math.muni.cz

Obsah

| | | |
|-----------|--|------------|
| I | Diferenciální počet funkcí jedné proměnné | 5 |
| 1 | Reálná čísla a funkce | 7 |
| 1.1 | Reálná čísla | 7 |
| 1.2 | Funkce a jejich základní vlastnosti | 13 |
| 1.3 | Posloupnosti | 17 |
| 1.4 | Elementární funkce | 25 |
| 1.5 | Cvičení | 34 |
| 1.6 | Kontrolní otázky | 35 |
| 2 | Diferenciální počet | 37 |
| 2.1 | Limita funkce | 37 |
| 2.2 | Spojité funkce | 45 |
| 2.3 | Derivace | 49 |
| 2.4 | Derivace vyšších řádů, diferenciál | 54 |
| 2.5 | Obecné věty o derivaci | 56 |
| 2.6 | Taylorův vzorec | 59 |
| 2.7 | Průběh funkce | 62 |
| 2.8 | Cvičení | 67 |
| 2.9 | Kontrolní otázky | 69 |
| 3 | Doplněk | 71 |
| 3.1 | Diferenční a sumační počet | 71 |
| 3.2 | Rovinné křivky | 77 |
| II | Integrální počet funkcí jedné proměnné | 83 |
| 4 | Neurčitý integrál | 85 |
| 4.1 | Primitivní funkce | 85 |
| 4.2 | Cvičení | 90 |
| 4.3 | Kontrolní otázky | 91 |
| 5 | Určitý Riemannův integrál | 93 |
| 5.1 | Určitý integrál | 93 |
| 5.2 | Vlastnosti Riemannova integrálu | 101 |
| 5.3 | Integrál jako funkce horní meze | 109 |
| 5.4 | Nevlastní integrály | 110 |
| 5.5 | Aplikace určitého integrálu | 115 |
| 5.6 | Cvičení | 117 |
| 5.7 | Kontrolní otázky | 118 |
| 6 | Doplněk | 119 |
| 6.1 | Numerická integrace | 119 |

| | | |
|------------|---|------------|
| III | Nekonečné řady | 123 |
| 7 | Číselné řady | 125 |
| 7.1 | Pojem řady a jejího součtu | 125 |
| 7.2 | Řady s nezápornými členy | 129 |
| 7.3 | Řady absolutně a neabsolutně konvergentní | 133 |
| 7.4 | Dvojně řady | 138 |
| 7.5 | Součin řad | 141 |
| 7.6 | Cvičení | 144 |
| 7.7 | Kontrolní otázky | 144 |
| 8 | Řady funkcí | 145 |
| 8.1 | Posloupnosti a řady funkcí | 145 |
| 8.2 | Vlastnosti stejnoměrně konvergentních posloupností a řad | 149 |
| 8.3 | Mocninné řady | 153 |
| 8.4 | Cvičení | 158 |
| 8.5 | Kontrolní otázky | 159 |
| 9 | Fourierovy řady | 161 |
| 9.1 | Hilbertův prostor | 161 |
| 9.2 | Prostor $\mathcal{L}^2(a, b)$ | 167 |
| 9.3 | Fourierovy řady vzhledem k trigonometrickému systému | 171 |
| 9.4 | Cvičení | 176 |
| 9.5 | Kontrolní otázky | 177 |
| 10 | Doplněk | 179 |
| 10.1 | Fourierův integrál | 179 |
| 10.2 | Aplikace Fourierových řad | 181 |
| IV | Diferenciální počet funkcí n proměnných | 185 |
| 11 | Metrické prostory | 187 |
| 11.1 | Pojem metriky | 187 |
| 11.2 | Podmnožiny metrického prostoru | 190 |
| 11.3 | Konvergence | 193 |
| 11.4 | Úplné a kompaktní prostory | 195 |
| 11.5 | Zobrazení metrických prostorů | 198 |
| 11.6 | Cvičení | 201 |
| 11.7 | Kontrolní otázky | 202 |
| 12 | Diferenciální počet | 203 |
| 12.1 | Spojitosť a limita | 203 |
| 12.2 | Derivace | 205 |
| 12.3 | Diferenciál | 208 |
| 12.4 | Derivace složené funkce, Taylorův vzorec | 211 |
| 12.5 | Průběh funkce více proměnných | 214 |
| 12.6 | Cvičení | 217 |
| 12.7 | Kontrolní otázky | 219 |
| 13 | Implicitní funkce a zobrazení | 221 |
| 13.1 | Implicitní funkce | 221 |
| 13.2 | Diferencovatelná zobrazení | 223 |
| 13.3 | Diferencovatelné variety | 228 |
| 13.4 | Vázané extrémy | 231 |
| 13.5 | Cvičení | 235 |
| 13.6 | Kontrolní otázky | 235 |

| | |
|---|------------|
| 14 Doplněk | 237 |
| 14.1 Vektorové funkce, skalární a vektorová pole | 237 |
| V Integrální počet funkcí n proměnných | 245 |
| 15 Jordanova míra | 247 |
| 15.1 Jordanova míra v \mathbb{R}^2 | 247 |
| 15.2 Závislost míry na transformaci souřadnic | 252 |
| 15.3 Jordanova míra v \mathbb{R}^k | 254 |
| 16 Riemannův integrál funkcí n proměnných | 255 |
| 16.1 Riemannův integrál | 255 |
| 16.2 Vlastnosti Riemannova integrálu | 258 |
| 16.3 Fubiniova věta | 264 |
| 16.4 Transformace integrálu | 267 |
| 16.5 Aplikace Riemannova integrálu | 268 |
| 16.6 Cvičení | 269 |
| 16.7 Kontrolní otázky | 271 |
| VI Diferenciální rovnice | 273 |
| 17 Obyčejné diferenciální rovnice | 275 |
| 17.1 Základní pojmy | 275 |
| 17.2 Elementární metody řešení ODR | 277 |
| 17.3 Existence a jednoznačnost řešení systému ODR | 283 |
| 17.4 Globální vlastnosti řešení systému ODR | 286 |
| 17.5 Systémy lineárních ODR | 288 |
| 17.6 Lineární diferenciální rovnice vyššího řádu | 292 |
| 17.7 Cvičení | 297 |
| 17.8 Kontrolní otázky | 298 |
| 18 Doplněk | 299 |
| 18.1 Eulerova numerická metoda řešení ODR | 299 |

Část I

**Diferenciální počet funkcí jedné
proměnné**

Kapitola 1

Reálná čísla a funkce

1.1 Reálná čísla

- Přírozená čísla: $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ Dospějeme k nim při počítání prvků nějaké množiny. Lze na nich definovat základní početní operace, uspořádání.
- Celá čísla: $\mathbb{Z} = \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$ Doplnění množiny \mathbb{N} tak, aby operace odčítání měla vždy výsledek.
- Racionální čísla: $\mathbb{Q} = \{\frac{m}{n} : m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}\}$ Doplnění množiny \mathbb{Z} tak, aby operace dělení měla vždy výsledek.
- Iracionální čísla: \mathbb{I} Čísla, která není možno vyjádřit ve tvaru $\frac{m}{n}$, kde $m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}$

Iracionální čísla potřebujeme. Např. $\log_{10} 3 \in \mathbb{I}$.

D.: Sporem. Pripusťme, že $\log_{10} 3 = \frac{m}{n}$. Pak

$$\begin{aligned}10^{\frac{m}{n}} &= 3 \\10^m &= 3^n \\2^m 5^m &= 3^n\end{aligned}$$

Dostali jsme dva různé rozklady jednoho čísla na prvočinitele. To je spor. \square

Nebo $\sqrt{2} \in \mathbb{I}$.

D.: Sporem. Pripusťme, že $\sqrt{2} = \frac{m}{n}$. Pak

$$\begin{aligned}2 &= \frac{m^2}{n^2} \\2n^2 &= m^2\end{aligned}$$

V rozkladu na prvočinitele čísla stojícího na levé straně rovnosti je 2 v liché mocnině, v rozkladu na prvočinitele čísla stojícího na pravé straně rovnosti (tedy téhož čísla) je 2 v sudé mocnině. To je spor. \square

1.1.1 Definice

Buď M množina, na níž je definováno uspořádání \leq . (Uspořádání je binární relace, která je

- reflexivní: $(\forall a \in M) (a \leq a)$
- antisymetrická: $(\forall a, b \in M) (a \leq b, b \leq a \Rightarrow a = b)$
- transitivní: $(\forall a, b, c \in M) (a \leq b, b \leq c \Rightarrow a \leq c)$

Buď $a \in M, A \subseteq M$. Řekneme, že a je *horní* (resp. *dolní*) *závora množiny A v množině M*, jestliže $x \leq a$ (resp. $a \leq x$) pro každé $x \in A$. Řekneme, že množina A je *ohraničená shora* (resp. *zdola*), jestliže existuje její horní (resp. dolní) *závora*. Řekneme, že množina A je *ohraničená*, je-li ohraničená shora i zdola.

1.1.2 Příklady

1. Množina $A = \{1, 1 + \frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}, \dots\}$ je ohraničená zdola (dolní závora je např. 1) a není ohraničená shora: Při označení $a_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n}$ je

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ a_4 &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} > 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 1 + \frac{2}{2} \\ a_8 &= a_4 + \frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} > 1 + \frac{2}{2} + \frac{4}{8} = 1 + \frac{3}{2} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Indukcí lze dokázat, že $a_{2^n} > 1 + \frac{n}{2}$ a číslo $1 + \frac{n}{2}$ může být libovolně velké.

2. Množina $B = \{1, 1 + \frac{1}{4}, 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{9}, \dots\}$ je ohraničená shora, $b \leq \frac{\pi^2}{6}$ pro každé $b \in B$. (Bude dokázáno později.)

1.1.3 Definice

Buď $A \subseteq M$, kde M je množina, na níž je definováno uspořádání \leq . Řekneme, že $a \in A$ je *maximum* nebo *největší prvek* (*minimum* nebo *nejmenší prvek*) a píšeme $a = \max A$ ($a = \min A$), jestliže pro každé $x \in A$ platí $x \leq a$ ($a \leq x$).

1.1.4 Definice

Buď M množina, na níž je definováno uspořádání \leq a buď $A \subseteq M$. Řekneme, že $a \in M$ je *supremum* množiny A , jestliže je nejmenší horní závora množiny A , t.j. jestliže platí

$$(s1) (\forall x \in A) (x \leq a),$$

$$(s2) ((\forall x \in A) (x \leq b)) \Rightarrow a \leq b.$$

Píšeme $a = \sup A$.

1.1.5 Definice

Buď M množina, na níž je definováno uspořádání \leq a buď $A \subseteq M$. Řekneme, že $a \in M$ je *infimum* množiny A , jestliže je největší dolní závora množiny A , t.j. jestliže platí

$$(i1) (\forall x \in A) (a \leq x),$$

$$(i2) ((\forall x \in A) (b \leq x)) \Rightarrow b \leq a.$$

Píšeme $a = \inf A$.

1.1.6 Poznámky

1. Podmínku (s2) v 1.1.4 lze nahradit podmínkou

$$(s2^*) (p \in M, p < a) \Rightarrow (\exists x \in A) (p < x).$$

($p < a$ je definováno jako $p \leq a$ a současně $p \neq a$; v dalším budeme používat i symboly $\geq, >$.)

D.: Nechť $a \in M$ splňuje (s2) a nechť $p \in M, p < a$. Pak p není horní závora množiny A (jinak by podle (s2) bylo $a \leq p$). Odtud plyne, že existuje $x \in A$ takové, že $x > p$, tedy platí (s2*).

Nechť $a \in M$ splňuje (s2*) a buď $b \in M$ horní závora množiny A . Kdyby $b < a$, pak by existovalo $x \in A$ takové, že $b < x$ a tedy b by nebyla horní závora množiny A . Je tedy $a \leq b$. \square

2. Analogicky lze dokázat, že podmínku (i2) v 1.1.5 lze nahradit podmínkou

$$(i2^*) (p \in M, p > a) \Rightarrow (\exists x \in A) (p > x).$$

3. Libovolná $A \subseteq M$ má nejvýše jedno supremum a nejvýše jedno infimum.

D.: Necht $a = \sup A$, $b = \sup A$. b je podle (s1) horní závora množiny A , tedy $a \leq b$ podle (s2). Analogicky a je horní závora A , tedy $b \leq a$. Z antisymetrie relace \leq plyne $a = b$. Analogicky se ukáže platnost tvrzení pro infimum. \square

4. Jestliže existuje $\max A$ ($\min A$), pak existuje také $\sup A$ ($\inf A$) a platí $\sup A = \max A$ ($\inf A = \min A$).

D.: Necht $a = \max A$.

a splňuje (s1) přímo podle definice maxima 1.1.3

Necht b je horní závora množiny A . Pak $b \geq x$ pro každé $x \in A$, zejména tedy $b \geq a \in A$. Což znamená, že platí (s2).

Tvrzení pro infimum a minimum se dokáže analogicky. \square

1.1.7 Definice

Množina reálných čísel je množina \mathbb{R} , na níž jsou definovány dvě binární operace $+$ (sčítání), \cdot (násobení) a jedna binární relace $<$ (menší než), které splňují podmínky

- (R1) pro všechna $a, b \in \mathbb{R}$ platí $a + b = b + a$ (komutativní zákon pro sčítání)
- (R2) pro všechna $a, b, c \in \mathbb{R}$ platí $(a + b) + c = a + (b + c)$ (asociativní zákon pro sčítání)
- (R3) existuje prvek $0 \in \mathbb{R}$ takový, že pro všechna $a \in \mathbb{R}$ platí $a + 0 = a$ (existence neutrálního prvku vzhledem ke sčítání)
- (R4) ke každému $a \in \mathbb{R}$ existuje prvek $-a \in \mathbb{R}$ takový, že $a + (-a) = 0$ (existence opačného prvku)
- (R5) pro všechna $a, b \in \mathbb{R}$ platí $a \cdot b = b \cdot a$ (komutativní zákon pro násobení)
- (R6) pro všechna $a, b, c \in \mathbb{R}$ platí $(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$ (asociativní zákon pro násobení)
- (R7) existuje prvek $1 \in \mathbb{R}$, $1 \neq 0$ takový, že pro všechna $a \in \mathbb{R}$ platí $a \cdot 1 = a$ (existence neutrálního prvku vzhledem k násobení)
- (R8) ke každému $a \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$ existuje prvek $a^{-1} \in \mathbb{R}$ takový, že $a \cdot a^{-1} = 1$ (existence inverzního prvku)
- (R9) pro všechna $a, b, c \in \mathbb{R}$ platí $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$ (distributivní zákon)
- (R10) každé dva prvky z množiny \mathbb{R} jsou srovnatelné, podrobněji: každá dvojice prvků $a, b \in \mathbb{R}$ splňuje právě jeden ze vztahů $a < b$, $a = b$, $b < a$ (zákon trichotomie)
- (R11) jestliže pro $a, b, c \in \mathbb{R}$ platí $a < b$ a $b < c$, pak také $a < c$ (transitivita relace $<$)
- (R12) jestliže pro $a, b \in \mathbb{R}$ platí $a < b$, pak pro každé $c \in \mathbb{R}$ je $a + c < b + c$ (monotonie vzhledem ke sčítání)
- (R13) jestliže pro $a, b, c \in \mathbb{R}$ platí $a < b$ a $0 < c$, pak $a \cdot c < b \cdot c$ (monotonie vzhledem k násobení)
- (R14) je-li M neprázdná shora (zdola) ohraničená podmnožina množiny \mathbb{R} , pak existuje $\sup M \in \mathbb{R}$ ($\inf M \in \mathbb{R}$)

1.1.8 Poznámky

1. (R1) – (R4) a (R5) – (R8) jsou axiomy komutativní grupy

(R1) – (R9) jsou axiomy pole

(R1) – (R13) jsou axiomy uspořádaného pole

(R1) – (R14) jsou axiomy spojitě uspořádaného pole

Existuje jediné (až na isomorfismus) uspořádané pole. Axiom (R14) se nazývá axiom spojitosti.

2. Přímka, na níž je zvolen počátek (obraz reálného čísla 0), jednotková délka a orientace (obraz čísla 1) se nazývá *číselná osa*. Existuje prosté a vzájemně jednoznačné zobrazení množiny reálných čísel na číselnou osu.

3. Druhá část axiomu (R14) (existence infima) je důsledkem první části a ostatních axiomů.

D.: Nejdříve ukážeme, že pro každé $a \in \mathbb{R}$ je $-(-a) = a$. Vyjdeme z (R4):

$$\begin{aligned} (-a) + (-(-a)) &= 0 && / \text{ přičteme } a \text{ zleva} \\ a + ((-a) + (-(-a))) &= a + 0 && / \text{ (R2), (R3)} \\ (a + (-a)) + (-(-a)) &= a && / \text{ (R4)} \\ 0 + (-(-a)) &= a && / \text{ (R1), (R3)} \\ -(-a) &= a \end{aligned}$$

Dále ukážeme, že jestliže $a < b$ pak $-b < -a$:

$$\begin{aligned} a &< b && / +(-a) \text{ zprava} \\ a + (-a) &< b + (-a) && / \text{ (R4)} \\ 0 &< b + (-a) && / +(-b) \text{ zleva} \\ (-b) + 0 &< (-b) + (b + (-a)) && / \text{ (R3), (R2)} \\ -b &< ((-b) + b) + (-a) && / \text{ (R1), (R4)} \\ -b &< 0 + (-a) && / \text{ (R1), (R3)} \\ -b &< -a \end{aligned}$$

Nechť nyní je $\emptyset \neq M \subseteq \mathbb{R}$ zdola ohraničená, b její dolní závora. Položme $M' = \{-x : x \in M\}$. Pak pro každé $x \in M$ platí $b \leq x$ a tedy podle druhého kroku důkazu je $-x \leq -b$ pro každé $-x \in M'$. To znamená, že M' je shora ohraničená a podle první části (R14) existuje $\sup M' = s \in \mathbb{R}$. Podle (R4) je $-s \in \mathbb{R}$. Ukážeme, že $-s = \inf M$:

Buď $x \in M$ libovolné. Pak podle (s1) je $-x \leq s$ a podle pomocných tvrzení na začátku důkazu je $-s \leq x$. Poněvadž x bylo libovolné, je podmínka (i1) splněna.

Buď $c \in \mathbb{R}$ takové, že $c \leq x$ pro každé $x \in M$. Pak $-x \leq -c$ pro každé $-x \in M'$ a podle (s2) je $s \leq -c$, tedy $-(-c) \leq -s$. Podle prvního kroku důkazu je $c \leq -s$, což znamená, že i podmínka (i2) je splněna. \square

1.1.9 Příklad

Nechť $M = \{\frac{m}{n} : m, n \in \mathbb{N}, m < n\}$. Ukažte, že $\sup M = 1$, $\inf M = 0$.

Ř.: Platnost podmínky (s1): $\frac{m}{n} \leq 1$ pro $m \leq n$.

Platnost podmínky (s2*): Buď $p \in M$, $p < 1$. Je-li $p \leq 0$, pak např. pro $\frac{1}{2} \in M$ platí $p < \frac{1}{2}$. Nechť tedy $p > 0$. Položme $n = 1 + [\frac{1}{1-p}]$. (Přitom $[x]$ označuje celou část z čísla x , t.j. celé číslo z takové, že $x \leq z < x + 1$. Např. $[\pi] = 3$, $[\frac{3}{2}] = 1$, $[-3.5] = -4$ a p.) Pak

$$\begin{aligned} n &> \frac{1}{1-p} \\ n - np &> 1 \\ n - 1 &> np \\ \frac{n-1}{n} &> p \end{aligned}$$

a zřejmě $\frac{n-1}{n} \in M$.

Platnost podmínky (i1): $\frac{m}{n} > 0$ pro všechna $m, n \in \mathbb{N}$.

Platnost podmínky (i2*): Buď $p \in M$, $p > 0$. Je-li $p \geq 1$, pak např. pro $\frac{1}{2} \in M$ platí $\frac{1}{2} < p$. Nechť tedy $p < 1$. Položme $n = 1 + [\frac{1}{p}]$. Pak $n > \frac{1}{p}$ a tedy $p > \frac{1}{n} \in M$. \square

1.1.10 Definice

Množinu $\mathbb{R}^* = \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$ nazýváme *rozšířená množina reálných čísel*, symboly $-\infty, \infty$ nazýváme *nevlastní reálná čísla (nevlastní body číselné osy)*. Klademe $-\infty < a < \infty$ pro každé $a \in \mathbb{R}$.

Symboly $-\infty, \infty$ nejsou čísla, nedefinujeme pro ně početní operace.

1.1.11 Definice

Budte $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$. Uzavřeným intervalem o krajních (koncových, hraničních) bodech a, b rozumíme množinu

$$[a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\},$$

otevřeným intervalem množinu

$$(a, b) = \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\},$$

polouzavřenými intervaly zprava (resp. zleva) množiny

$$(a, b] = \{x \in \mathbb{R} : a < x \leq b\},$$

$$[a, b) = \{x \in \mathbb{R} : a \leq x < b\}.$$

Nekonečné intervaly definujeme jako množiny

$$\begin{aligned} [a, \infty) &= \{x \in \mathbb{R} : x \geq a\}, \\ (a, \infty) &= \{x \in \mathbb{R} : x > a\}, \\ (-\infty, b] &= \{x \in \mathbb{R} : x \leq b\}, \\ (-\infty, b) &= \{x \in \mathbb{R} : x < b\}, \\ (-\infty, \infty) &= \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Je-li J interval jakéhokoliv typu a $x_0 \in J$, x_0 není krajní, řekneme, že x_0 je vnitřní bod intervalu J .

1.1.12 Definice

Okolím (podrobněji (symetrickým) δ -okolím, $\delta > 0$) bodu $x_0 \in \mathbb{R}$ rozumíme interval $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$.

Okolím bodu ∞ rozumíme interval (a, ∞) , kde $a \in \mathbb{R}$.

Okolím bodu $-\infty$ rozumíme interval $(-\infty, a)$, kde $a \in \mathbb{R}$.

δ -okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$ budeme označovat symbolem $\mathcal{O}_\delta(x_0)$, stručně $\mathcal{O}(x_0)$.

1.1.13 Věta

Okolí bodů z množiny \mathbb{R} mají tyto vlastnosti:

(o1) Jsou-li $\mathcal{O}_1(x_0)$ a $\mathcal{O}_2(x_0)$ dvě okolí téhož bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$, pak $\mathcal{O}_1(x_0) \cap \mathcal{O}_2(x_0)$ je okolí bodu x_0 .

(o2) Jsou-li $x_1, x_2 \in \mathbb{R}^*$, $x_1 \neq x_2$, pak existují $\mathcal{O}(x_1)$ a $\mathcal{O}(x_2)$ taková, že $\mathcal{O}(x_1) \cap \mathcal{O}(x_2) = \emptyset$.

D.:

- $x_0 \in \mathbb{R}$, $\mathcal{O}_1(x_0) = (x_0 - \delta_1, x_0 + \delta_1)$, $\mathcal{O}_2(x_0) = (x_0 - \delta_2, x_0 + \delta_2)$. Položme $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2\}$. Pak $\mathcal{O}(x_0) = (x_0 - \delta, x_0 + \delta) = \mathcal{O}_1(x_0) \cap \mathcal{O}_2(x_0)$ je okolí bodu x_0 .
 - $x_0 = \infty$, $\mathcal{O}_1(x_0) = (a_1, \infty)$, $\mathcal{O}_2(x_0) = (a_2, \infty)$. Položme $a = \max\{a_1, a_2\}$. Pak $\mathcal{O}(x_0) = (a, \infty) = \mathcal{O}_1(x_0) \cap \mathcal{O}_2(x_0)$ je okolí bodu ∞ .
 - $x_0 = -\infty$. Platnost tvrzení ukážeme analogicky jako v předchozím případě.
- Bez újmy na obecnosti lze předpokládat, že $x_1 < x_2$.
 - $-\infty < x_1 < x_2 < \infty$. Položme $\delta = \frac{1}{4}(x_2 - x_1)$. Pak $\mathcal{O}(x_1) = (x_1 - \delta, x_1 + \delta)$, $\mathcal{O}(x_2) = (x_2 - \delta, x_2 + \delta)$ jsou okolí bodů x_1, x_2 s požadovanou vlastností. (Volba $\delta = \frac{1}{4}(x_2 - x_1)$ samozřejmě není jediná možná. Stačí volit $\delta = r(x_2 - x_1)$, kde $r \leq \frac{1}{2}$.)
 - $-\infty < x_1 < x_2 = \infty$. Nechť $\delta > 0$ je libovolné a položme $a = x_1 + 2\delta$. Pak $\mathcal{O}(x_1) = (x_1 - \delta, x_1 + \delta)$, $\mathcal{O}(x_2) = (a, \infty)$ mají požadovanou vlastnost.
 - Analogicky ukážeme platnost tvrzení v ostatních případech.

□

1.1.14 Definice

Buď $x_0 \in \mathbb{R}$. *Ryzím okolím* bodu x_0 rozumíme množinu $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$.

Okolí nevlastního bodu je vždy ryzí.

Ryzí okolí bodu x_0 budeme označovat $\mathcal{O}'(x_0)$.

1.1.15 Definice

Buď $x_0 \in \mathbb{R}$, $\delta > 0$. *Pravým* (resp. *levým*) δ -*okolím* bodu x_0 rozumíme interval $[x_0, x_0 + \delta)$ ($(x_0 - \delta, x_0]$). *Ryzím pravým* (resp. *levým*) δ -*okolím* bodu x_0 rozumíme otevřený interval $(x_0, x_0 + \delta)$ ($(x_0 - \delta, x_0)$).

Pravé (resp. levé) δ -okolí bodu x_0 budeme označovat $\mathcal{P}_\delta(x_0)$, stručně $\mathcal{P}(x_0)$ (resp. $\mathcal{L}_\delta(x_0)$, stručně $\mathcal{L}(x_0)$).

Ryzí pravé (resp. levé) δ -okolí bodu x_0 budeme označovat $\mathcal{P}'_\delta(x_0)$, stručně $\mathcal{P}'(x_0)$ (resp. $\mathcal{L}'_\delta(x_0)$, stručně $\mathcal{L}'(x_0)$).

1.1.16 Poznámky

1. Také pravá a levá okolí, ryzí okolí mají vlastnosti (o1), (o2) z věty 1.1.13.

D.: Snadnou modifikací důkazu 1.1.13. \square

2. Buď $J \subseteq \mathbb{R}$ interval a buď x_0 vnitřní bod intervalu J . Pak existuje $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že $\mathcal{O}(x_0) \subseteq J$.

D.: Nechť $a, b \in \mathbb{R}^*$ jsou krajní body intervalu J .

- Jsou-li $a, b \in \mathbb{R}$, položíme $\delta = \frac{1}{2} \min\{x_0 - a, b - x_0\}$. Pak $\delta > 0$ a $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ je požadované okolí.
- Jsou-li $a \in \mathbb{R}$ a $b = \infty$, položíme $\delta = \frac{1}{2}(x_0 - a)$. Pak $\delta > 0$ a $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ je opět požadované okolí.
- Analogicky ukážeme platnost tvrzení v ostatních případech.

\square

1.1.17 Věta

1. Mezi dvěma libovolnými reálnými čísly x_1, x_2 , $x_1 < x_2$ leží racionální i iracionální číslo.
2. V libovolném okolí libovolného čísla $x_0 \in \mathbb{R}$ leží racionální i iracionální číslo.

(Stručně: Množina \mathbb{Q} i množina \mathbb{I} je hustá v množině \mathbb{R} .)

D.:

1. • Položme $n = \lceil \frac{1}{x_2 - x_1} \rceil + 1$, $m = \lfloor nx_1 \rfloor + 1$. Pak $m \in \mathbb{Z}$, $n \in \mathbb{N}$ a tedy $q = \frac{m}{n} \in \mathbb{Q}$. Dále platí

$$\begin{array}{lll} m > nx_1 & m \leq nx_1 + 1 & n > \frac{1}{x_2 - x_1} \\ x_1 < \frac{m}{n} & & nx_2 - nx_1 > 1 \\ & & nx_2 > nx_1 + 1 \end{array}$$

Odtud $x_1 < \frac{m}{n} \leq \frac{nx_1 + 1}{n} < \frac{nx_2}{n} = x_2$, což znamená, že q je racionální číslo mezi čísly x_1 a x_2 .

- Položme $s = \lceil \frac{\sqrt{2}}{x_2 - x_1} \rceil + 1$, $r = \lfloor \frac{s}{\sqrt{2}} x_1 \rfloor + 1$. Pak $r \in \mathbb{Z}$, $s \in \mathbb{N}$ a $w = \frac{\sqrt{2}r}{s} \in \mathbb{I}$, neboť v opačném případě by $\sqrt{2} \in \mathbb{Q}$, což by byl spor s tvrzením dokázaným v úvodu tohoto odstavce. Dále platí

$$\begin{array}{lll} r > \frac{s}{\sqrt{2}} x_1 & r \leq \frac{s}{\sqrt{2}} x_1 + 1 & s > \frac{\sqrt{2}}{x_2 - x_1} \\ x_1 < \frac{\sqrt{2}r}{s} & & \frac{s}{\sqrt{2}} x_2 > \frac{s}{\sqrt{2}} x_1 + 1 \end{array}$$

Odtud $x_1 < \frac{\sqrt{2}r}{s} \leq \frac{\sqrt{2}(\frac{s}{\sqrt{2}}x_1 + 1)}{s} < \frac{\sqrt{2} \frac{s}{\sqrt{2}} x_2}{s} = x_2$, což znamená, že w je iracionální číslo mezi čísly x_1 a x_2 .

2. je důsledkem 1., neboť mezi čísly $x_0 - \delta$ a $x_0 + \delta$ leží racionální i iracionální číslo.

\square

1.2 Funkce a jejich základní vlastnosti

1.2.1 Definice

Funkce f (podrobněji *reálná funkce jedné reálné proměnné*) je zobrazení z množiny \mathbb{R} do množiny \mathbb{R} .

Množina $\text{Dom } f = \{x \in \mathbb{R} : (\exists y \in \mathbb{R})(x, y) \in f\}$ se nazývá *definiční obor funkce f* . (Domain)

Množina $\text{Im } f = \{y \in \mathbb{R} : (\exists x \in \mathbb{R})(x, y) \in f\}$ se nazývá *obor hodnot funkce f* . (Image)

Je-li f funkce, pak zobrazení $f : \text{Dom } f \rightarrow \text{Im } f$ je surjekce (zobrazení na).

Je-li $(x, y) \in f$, píšeme $y = f(x)$, $x \mapsto y$, $x \xrightarrow{f} y$.

Prvky z $\text{Dom } f$ se nazývají hodnoty nezávisle proměnné, argument.

Prvky z $\text{Im } f$ se nazývají hodnoty závisle proměnné, funkční hodnota.

Pokud není explicitně uvedeno jinak, definičním oborem rozumíme největší (vzhledem k množinové inkluzi) množinu, pro jejíž prvky lze funkční hodnotu vypočítat.

1.2.2 Definice

Grafem funkce f rozumíme množinu $\mathcal{G} = \{(x, f(x)) : x \in \text{Dom } f\}$, kde (x, y) značí ortogonální kartézské souřadnice bodu v rovině.

1.2.3 Příklad

1. $f(x) = |x| = \max\{x, -x\}$, $\text{Dom } f = \mathbb{R}$, $\text{Im } f = [0, \infty)$.

2. $f(x) = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}$, $\text{Dom } f = (-1, 1)$, neboť musí platit $\text{Im } f = \mathbb{R}$, neboť pro libovolné $r \in \mathbb{R}$ je

$$\begin{aligned} 1 - x^2 &> 0 \\ 1 &> x^2 \\ 1 &> |x| \end{aligned} \qquad \begin{aligned} r &= \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} \\ (1-x^2)r^2 &= x^2 \\ r^2 &= (1+r^2)x^2 \\ x_{1,2} &= \pm \frac{|r|}{\sqrt{1+r^2}} \end{aligned}$$

Znaménko u x musí být stejné jako znaménko u r , tedy $x = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}}$

3. $f(x) = [x]$, kde $[x]$ je celá část z čísla x , to jest celé číslo takové, že $[x] \leq x < [x] + 1$.

$\text{Dom } f = \mathbb{R}$, $\text{Im } f = \mathbb{Z}$.

4. Dirichletova funkce $\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \in \mathbb{Q} \\ 0, & x \in \mathbb{I} \end{cases}$.

$\text{Dom } \chi = \mathbb{R}$, $\text{Im } \chi = \{0, 1\}$.

1.2.4 Definice

Budte f, g funkce, $\text{Dom } f \cap \text{Dom } g \neq \emptyset$. Pak definujeme

součet funkcí f, g předpisem: $(f+g)(x) = f(x) + g(x)$ pro $x \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$,

rozdíl funkcí f, g předpisem: $(f-g)(x) = f(x) - g(x)$ pro $x \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$,

součin funkcí f, g předpisem: $(fg)(x) = f(x)g(x)$ pro $x \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$,

podíl funkcí f, g předpisem: $\left(\frac{f}{g}\right)(x) = \frac{f(x)}{g(x)}$ pro $x \in \text{Dom } f \cap (\text{Dom } g \setminus \{x \in \text{Dom } g : g(x) = 0\})$,

absolutní hodnotu funkce f předpisem $|f|(x) = |f(x)| = \max\{f(x), -f(x)\}$ pro $x \in \text{Dom } f$.

1.2.5 Definice

Funkce f se nazývá *ohraničená* (*shora ohraničená*, *zdola ohraničená*), je-li množina $\text{Im } f$ ohraničená (shora ohraničená, zdola ohraničená) podmnožina množiny \mathbb{R} .

Funkce f je ohraničená právě tehdy, když existují $a, b \in \mathbb{R}$ taková, že $a \leq f(x) \leq b$ pro každé $x \in \text{Dom } f$, což nastane právě tehdy, když existuje $h \in \mathbb{R}$ takové, že $|f(x)| \leq h$ pro každé $x \in \text{Dom } f$. Analogická tvrzení platí pro funkci ohraničenou shora nebo zdola.

1.2.6 Definice

Funkce f se nazývá *sudá*, jestliže $x \in \text{Dom } f \Rightarrow -x \in \text{Dom } f, f(-x) = f(x)$.

Funkce f se nazývá *lichá*, jestliže $x \in \text{Dom } f \Rightarrow -x \in \text{Dom } f, f(-x) = -f(x)$.

Příklady sudé funkce: x^{2n} , kde $n \in \mathbb{N}$, $|x|$, $\cos x$.

Příklady liché funkce: x^{2n+1} , kde $n \in \mathbb{N}$, $\sin x$, $\text{tg } x$.

Buď f sudá funkce, G její graf, $(x, y) \in G$. Pak $(-x, y) \in G$. Body (x, y) a $(-x, y)$ jsou symetrické podle osy y , graf sudé funkce je symetrický podle osy y .

Buď f lichá funkce, G její graf, $(x, y) \in G$. Pak $(-x, -y) \in G$. Body (x, y) a $(-x, -y)$ jsou symetrické podle počátku souřadného systému, graf liché funkce je symetrický podle počátku souřadného systému.

1.2.7 Věta

Má-li funkce f vlastnost: $x \in \text{Dom } f \Rightarrow -x \in \text{Dom } f$, pak ji lze vyjádřit jako součet funkce sudé a liché.

D.: $f(x) = \frac{1}{2}(f(x) + f(-x)) + \frac{1}{2}(f(x) - f(-x))$
 $g(x) = \frac{1}{2}(f(x) + f(-x)); g(-x) = \frac{1}{2}(f(-x) + f(x)) = g(x); g(x)$ je sudá,
 $h(x) = \frac{1}{2}(f(x) - f(-x)); h(-x) = \frac{1}{2}(f(-x) - f(x)) = -\frac{1}{2}(f(x) - f(-x)) = -h(x); h(x)$ je lichá. \square

1.2.8 Definice

Buď $p \in \mathbb{R}, p > 0$. Řekneme, že funkce f je *periodická s periodou p* , jestliže $x \in \text{Dom } f \Rightarrow x + p \in \text{Dom } f, f(x + p) = f(x)$.

Příklady: $\sin x, \cos x$ — perioda 2π ,

$\text{tg } x$ — perioda π ,

$\sin \frac{x}{2\pi}$ — perioda 1,

konstantní funkce $f(x) = c \in \mathbb{R}$ — periodou je jakékoliv $p \in (0, \infty)$.

Buď f funkce periodická s periodou $p > 0, n \in \mathbb{N}$. Pak f je periodická s periodou np .

D.: $x \in \text{Dom } f \Rightarrow x + p \in \text{Dom } f \Rightarrow x + p + p = x + 2p \in \text{Dom } f \Rightarrow \dots \Rightarrow x + np \in \text{Dom } f$.
 $f(x + np) = f(x + (n-1)p + p) = f(x + (n-1)p) = f(x + (n-2)p + p) = f(x + (n-2)p) = \dots = f(x)$. \square

Množina period periodické funkce f je nekonečná, tedy neprázdná a zdola ohraničená nulou. Podle 1.1.7 (R14) existuje $p_0 = \inf\{p : p \text{ je perioda funkce } f\}$. Pokud p_0 je periodou funkce f , nazýváme ji *nejmenší* nebo *základní* periodou funkce f . Periodická funkce nemusí mít nejmenší periodu. Např. periodou Dirichletovy funkce je každé kladné racionální číslo.

1.2.9 Definice

Funkce f se nazývá *rostoucí v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$* , jestliže existuje $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že $\mathcal{O}(x_0) \subseteq \text{Dom } f$ a platí

$$\begin{aligned}x \in \mathcal{O}(x_0), x < x_0 &\Rightarrow f(x) < f(x_0) \\x \in \mathcal{O}(x_0), x > x_0 &\Rightarrow f(x) > f(x_0),\end{aligned}$$

stručně: jestliže pro $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ platí $(x - x_0)(f(x) - f(x_0)) > 0$.

Funkce f se nazývá *neklesající v bodě* $x_0 \in \text{Dom } f$, jestliže existuje $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že $\mathcal{O}(x_0) \subseteq \text{Dom } f$ a platí

$$\begin{aligned} x \in \mathcal{O}(x_0), x < x_0 &\Rightarrow f(x) \leq f(x_0) \\ x \in \mathcal{O}(x_0), x > x_0 &\Rightarrow f(x) \geq f(x_0), \end{aligned}$$

stručně: jestliže pro $x \in \mathcal{O}(x_0)$ platí $(x - x_0)(f(x) - f(x_0)) \geq 0$.

Analogicky definujeme funkci *klesající* a *nerostoucí v bodě* $x_0 \in \text{Dom } f$.

Funkce, která je v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ nerostoucí nebo neklesající, se nazývá *monotonní v bodě* $x_0 \in \text{Dom } f$.

Funkce, která je v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ rostoucí nebo klesající, se nazývá *ryze monotonní v bodě* $x_0 \in \text{Dom } f$.

Funkce rostoucí v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ nemusí být rostoucí v žádném jiném bodě z $\text{Dom } f$.

1.2.10 Definice

Řekneme, že funkce je *rostoucí* na intervalu J , jestliže $J \subseteq \text{Dom } f$ a pro libovolná $x_1, x_2 \in J$ platí $x_1 < x_2 \Rightarrow f(x_1) < f(x_2)$.

Řekneme, že funkce je *neklesající* na intervalu J , jestliže $J \subseteq \text{Dom } f$ a pro libovolná $x_1, x_2 \in J$ platí $x_1 < x_2 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2)$.

Analogicky definujeme funkci *klesající* a *nerostoucí* na intervalu J .

Funkce rostoucí nebo klesající na intervalu se nazývá *ryze monotonní na intervalu*, funkce nerostoucí nebo neklesající na intervalu se nazývá *monotonní na intervalu*.

Monotonie v bodě — *lokální vlastnost*

Monotonie na intervalu — *globální vlastnost*

Slova „interval J “ v předchozí definici lze nahradit slovy „množina $M \subseteq \text{Dom } f$ “.

1.2.11 Věta

Funkce f je rostoucí na otevřeném intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$ právě tehdy, když je rostoucí v každém bodě tohoto intervalu.

D.: „ \Rightarrow “ Nechť f je rostoucí na J a nechť $x_0 \in J$. J je otevřený $\Rightarrow x_0$ je vnitřní bod \Rightarrow (podle 1.1.16.2) existuje $\mathcal{O}(x_0) \subseteq J$. Tedy $\mathcal{O}(x_0) \subseteq \text{Dom } f$. Je-li $x \in \mathcal{O}(x_0)$, $x < x_0$, je $f(x) < f(x_0)$; je-li $x \in \mathcal{O}(x_0)$, $x > x_0$, je $f(x) > f(x_0)$. Tedy f je rostoucí v bodě x_0 .

„ \Leftarrow “ Nechť f je rostoucí v každém bodě intervalu J . Připustíme, že f není rostoucí na J . Existují tedy $x_1, x_2 \in J$, že $x_1 < x_2$ a $f(x_1) \geq f(x_2)$. Označme $M = \{x \in [x_1, x_2] : f(x) > f(x_1)\}$. Platí

- $M \neq \emptyset$, neboť f rostoucí v $x_1 \Rightarrow \text{ex. } \mathcal{O}(x_1)$, že pro každé $x > x_1$ je $f(x) > f(x_1)$.
- M je shora ohraničená, neboť x_2 je horní závora M .

Podle 1.1.7 (R14) existuje $x_0 = \sup M \leq x_2$.

– Předpokládejme $x_0 = x_2$. f je rostoucí v bodě $x_2 \Rightarrow$ existuje $\mathcal{O}(x_2) = (x_2 - \delta, x_2 + \delta) \subseteq \text{Dom } f$, že pro $x \in \mathcal{O}(x_2)$, $x < x_2$ platí $f(x) < f(x_2)$.

Podle 1.1.6(s2*) existuje $x \in M$, $x > x_2 - \delta$. Poněvadž $x \in M$, je $x \leq x_2$. Jest $x \in \mathcal{O}(x_2)$. Pokud $x < x_2$, pak $f(x) < f(x_2)$, pokud $x = x_2$, pak $f(x) = f(x_2)$. Tedy $f(x) \leq f(x_2)$.

Současně $x \in M$ a tedy $f(x) > f(x_1) \geq f(x_2)$. Odtud $f(x) > f(x_2)$ — spor.

– Musí tedy být $x_0 < x_2$. Poněvadž f je rostoucí v x_0 , existuje $\mathcal{O}(x_0)$, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ platí $(x - x_0)(f(x) - f(x_0)) > 0$. Bez újmy na obecnosti lze předpokládat $\mathcal{O}(x_0) = (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \subseteq [x_1, x_2]$. Podle 1.1.6(s2*) existuje $x \in M$, $x > x_0 - \delta$ takové, že $x \leq x_0$. $x \in \mathcal{O}(x_0)$ a tedy $f(x) \leq f(x_0)$. Současně $f(x) > f(x_1)$, neboť $x \in M$. Odtud plyne

$$f(x_1) < f(x_0).$$

Zvolme $x \in \mathcal{O}(x_0)$, $x > x_0$. Pak $f(x) > f(x_0)$. Přitom $x \notin M$, neboť $x > x_0 = \sup M$. Tedy $f(x) \leq f(x_1)$. Odtud plyne

$$f(x_1) > f(x_0).$$

To je spor. \square

1.2.12 Poznámky

1. Analogická věta platí pro neklesající, klesající a nerostoucí funkci.
2. Pro uzavřený interval věta neplatí:
Např. $f(x) = \sin(x)$, $J = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. f je rostoucí na celém J , ale není rostoucí v krajních bodech.
3. Ve druhé části důkazu jsme nevyužili předpoklad, že interval J je otevřený. Platí tedy: Je-li funkce f rostoucí v každém bodě libovolného intervalu J , pak je rostoucí na celém intervalu J .

1.2.13 Definice

Budte f, φ funkce a nechtě platí $\text{Im } \varphi \subseteq \text{Dom } f$. Pak

$$F = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : (\exists u \in \mathbb{R})((x, u) \in \varphi, (u, y) \in f)\}$$

se nazývá *složená funkce*.

Funkce φ se nazývá *vnitřní složka* funkce F , funkce f se nazývá *vnější složka* funkce F .

$$x \mapsto \varphi(x) = u \mapsto f(u) = f(\varphi(x))$$

Podmínka $\text{Im } \varphi \subseteq \text{Dom } f$ je nutná a dostatečná pro existenci složené funkce. Není-li tato podmínka splněna, lze jí někdy dosáhnout vhodným zúžením $\text{Dom } \varphi$.

1.2.14 Příklady

1. $\varphi(x) = x^2$, $\text{Im } \varphi = [0, \infty)$
 $f(u) = \sin(u)$, $\text{Dom } f = (-\infty, \infty)$. Tedy $\text{Im } \varphi \subseteq \text{Dom } f$, $F(x) = f(\varphi(x)) = \sin x^2$
2. $\varphi(x) = 1 - x^2$, definujeme $\text{Dom } f = [-1, 1]$. Pak $\text{Im } \varphi = [0, 1]$.
 $f(u) = \sqrt{u}$, $\text{Dom } f = [0, \infty)$. $[0, 1] \subseteq [0, \infty)$, $F(x) = f(\varphi(x)) = \sqrt{1 - x^2}$.
3. $\varphi(x) = -x^2$, $\text{Im } \varphi = (-\infty, 0]$
 $f(x) = \log x$, $\text{Dom } f = (0, \infty)$. Složená funkce neexistuje.

Proces skládání funkcí lze opakovat a vytvářet funkce vícenásobně složené. Např.:

$$\begin{aligned} y = \log^2 \sqrt{\sin x}: & \quad y = u^2 \\ & \quad u = \log v \\ & \quad v = \sqrt{w} \\ & \quad w = \sin x \end{aligned}$$

1.2.15 Definice

Nechť f je funkce, která je bijekcí. Pak

$$f^{-1} = \{(y, x) \in \mathbb{R}^2 : (x, y) \in f\}$$

se nazývá *inversní funkce* k funkci f .

Z definice plyne: $\text{Dom } f = \text{Im } f^{-1}$, $\text{Im } f = \text{Dom } f^{-1}$, $x = f^{-1}(y) \Leftrightarrow y = f(x)$.

Zobrazení $f : \text{Dom } f \rightarrow \text{Im } f$ je surjekce. Aby toto zobrazení bylo bijekcí, musí být injekcí (prostým zobrazením), t.j. $x_1, x_2 \in \text{Dom } f$, $x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$.

1.2.16 Poznámky

1. Graf inverzní funkce f^{-1} je symetrický s grafem funkce f podle osy prvního a třetího kvadrantu.
2. Je-li funkce f ryze monotónní, pak je prostá.

D.: Nechtě pro určitost je f rostoucí a budte $x_1, x_2 \in \text{Dom } f$, $x_1 \neq x_2$. Pokud $x_1 < x_2$ pak $f(x_1) < f(x_2)$, pokud $x_1 > x_2$ pak $f(x_1) > f(x_2)$ a tedy $f(x_1) \neq f(x_2)$. \square

1.2.17 Věta

Nechť funkce f je rostoucí (resp. klesající) na množině $\text{Dom } f$. Pak funkce f^{-1} je rostoucí (resp. klesající) na množině $\text{Im } f$.

D.: Nechť f je rostoucí na $\text{Dom } f$ a buďte $y_1, y_2 \in \text{Im } f$, $y_1 < y_2$.

Označme $x_1 = f^{-1}(y_1)$, $x_2 = f^{-1}(y_2)$, t.j. $y_1 = f(x_1)$, $y_2 = f(x_2)$.

Jest $x_1 \neq x_2$ podle 1.2.16.2. Kdyby $x_1 > x_2$, pak by $y_1 = f(x_1) > f(x_2) = y_2$, což by byl spor. Platí tedy $x_1 = f^{-1}(y_1) < f^{-1}y_2 = x_2$. \square

1.3 Posloupnosti

1.3.1 Definice

Posloupnost je funkce f , pro niž $\text{Dom } f = \mathbb{N}$. (t.j. $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$)

Označení: $f_n = f(n)$, častěji a_n, b_n, \dots
 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$, stručně $\{a_n\}$ — posloupnost
 a_n — člen posloupnosti

Posloupnosti mohou mít vlastnosti: ohraničenost, monotonie, periodicitu (s periodou $p \in \mathbb{N}$) zavedené v 1.2. Naopak pojmy inverzní nebo složená posloupnost nemají smysl.

Platí: $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je rostoucí $\Leftrightarrow (\forall n \in \mathbb{N})(a_n < a_{n+1})$
 $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je neklesající $\Leftrightarrow (\forall n \in \mathbb{N})(a_n \leq a_{n+1})$
a podobně.

1.3.2 Definice

Řekneme, že posloupnost $\{a_n\}$ má limitu a a píšeme $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$, nebo stručněji $\lim a_n = a$, $a_n \rightarrow a$, jestliže ke každému $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ platí $|a_n - a| < \varepsilon$. Posloupnost, která má limitu, se nazývá konvergentní.

1.3.3 Věta (o jednoznačnosti limity)

Libovolná posloupnost má nejvýše jednu limitu.

D.: Pripusťme, že pro $\{a_n\}$ platí $\lim a_n = a$, $\lim a_n = b$, $a \neq b$.

Nechť pro určitost $a < b$. Položme $\varepsilon = \frac{b-a}{2}$. Pak $\varepsilon > 0$.

Tedy existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že $n \geq n_1 \Rightarrow |a_n - a| < \varepsilon$

a existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že $n \geq n_2 \Rightarrow |a_n - b| < \varepsilon$

Položme $n_0 = \max\{n_1, n_2\}$. Pak pro $n \geq n_0$ platí $a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$, $b - \varepsilon < a_n < b + \varepsilon$,

tedy $b - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$ a poněvadž $b - \varepsilon = b - \frac{b-a}{2} = \frac{b+a}{2}$
 $a + \varepsilon = a + \frac{b-a}{2} = \frac{a+b}{2}$

platí $\frac{b+a}{2} < \frac{b+a}{2}$, což je spor. \square

1.3.4 Věta

Konvergentní posloupnost je ohraničená.

D.: Nechť $\lim a_n = a$ a buď $\varepsilon > 0$. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ platí $a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$.

Buď $h = \max\{a_1, a_2, \dots, a_{n_0-1}, a + \varepsilon\}$, $d = \min\{a_1, a_2, \dots, a_{n_0-1}, a - \varepsilon\}$.

Pak pro každé $n \in \mathbb{N}$ platí $d \leq a_n \leq h$. \square

1.3.5 Poznámky

1. Budte $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ konvergentní posloupnosti, $\lim a_n = a$, $\lim b_n = b$. Jestliže existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ platí $a_n < b_n$, pak $a \leq b$.

D.: Pripusťme $a > b$ a položme $\varepsilon = \frac{a-b}{2}$. Pak $\varepsilon > 0$ a existují

$n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_1$ je $a - \varepsilon < a_n < a + \varepsilon$,

$n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ je $b - \varepsilon < b_n < b + \varepsilon$.

Pro $n > n_3 = \max\{n_1, n_2, n_0\}$ nyní je $a - \varepsilon = \frac{a+b}{2} < a_n < b_n < b + \varepsilon = \frac{a+b}{2}$ — spor. \square

Tvrzení zůstane v platnosti i za předpokladu $a_n \leq b_n$ pro $n \geq n_0$.

2. Řekneme, že posloupnost $\{a_n\}$ je *skorostacionární*, jestliže existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ je $a_n = a$. Řekneme, že posloupnost $\{a_n\}$ je *stacionární*, jestliže pro každé $n \in \mathbb{N}$ je $a_n = a$. (Skoro)stacionární posloupnost je konvergentní a platí $\lim a_n = a$.

3. Buď $\{a_n\}$ konvergentní posloupnost, $\lim a_n = 0$ a $\{b_n\}$ buď ohraničená posloupnost. Pak $\lim a_n b_n = 0$.

D.: $\{b_n\}$ je ohraničená \Rightarrow existuje $h \in \mathbb{R}$, že $|b_n| < h$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\frac{\varepsilon}{h} > 0$ existuje n_0 takové, že pro $n \geq n_0$ je $|a_n| = |a_n - 0| < \frac{\varepsilon}{h}$.

Pro $n \geq n_0$ platí $|a_n b_n| = |a_n| |b_n| < \frac{\varepsilon}{h} h = \varepsilon$, tedy $\lim a_n b_n = 0$. \square

4. Jestliže posloupnost $\{a_n\}$ je monotonní a neohraničená, pak $\lim \frac{1}{a_n} = 0$.

D.: Buď $\{a_n\}$ neklesající a $\varepsilon > 0$ libovolné.

Poněvadž je $\{a_n\}$ neohraničená, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $a_{n_0} > \frac{1}{\varepsilon}$.

Poněvadž $\{a_n\}$ je neklesající, pro každé $n \geq n_0$ platí $a_n \geq a_{n_0} > \frac{1}{\varepsilon} > 0$.

Odtud plyne, že pro $n \geq n_0$ platí $\left| \frac{1}{a_n} - 0 \right| = \left| \frac{1}{a_n} \right| = \frac{1}{a_n} < \varepsilon$, tedy $\lim \frac{1}{a_n} = 0$.

Pro nerostoucí posloupnost se důkaz provede analogicky. \square

1.3.6 Věta

Budte $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ konvergentní posloupnosti, $\lim a_n = a$, $\lim b_n = b$. Pak

1. existuje $\lim |a_n|$ a platí $\lim |a_n| = |a|$,
2. existuje $\lim(a_n + b_n)$ a platí $\lim(a_n + b_n) = a + b$,
3. existuje $\lim a_n b_n$ a platí $\lim a_n b_n = ab$,
4. existuje $\lim(a_n - b_n)$ a platí $\lim(a_n - b_n) = a - b$,
5. pokud $b \neq 0$, pak existuje $\lim \frac{a_n}{b_n}$ a platí $\lim \frac{a_n}{b_n} = \frac{a}{b}$.

D.:

1. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Pak existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ je $|a_n - a| < \varepsilon$.

Pro $n \geq n_0$ tedy platí $||a_n| - |a|| \leq |a_n - a| < \varepsilon$, což znamená $\lim |a_n| = |a|$.

2. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_1$ je $|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$, a existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $|b_n - b| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí $|(a_n + b_n) - (a + b)| = |(a_n - a) + (b_n - b)| \leq |a_n - a| + |b_n - b| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$
a tedy $\lim(a_n + b_n) = a + b$.

3. Je-li $a = 0$, plyne tvrzení z 1.3.4 a z 1.3.5.3.

Nechť $a \neq 0$ a buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 1.3.4 existuje $h \in \mathbb{R}$ takové, že $|b_n| < h$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

K $\frac{\varepsilon}{2h} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_1$ je $|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2h}$.

K $\frac{\varepsilon}{2|a|} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $|b_n - b| < \frac{\varepsilon}{2|a|}$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí obě nerovnosti současně, tedy

$$\begin{aligned} |a_n b_n - ab| &= |a_n b_n - ab_n + ab_n - ab| \leq |a_n b_n - ab_n| + |ab_n - ab| = |a_n - a||b_n| + |a||b_n - b| < \\ &< \frac{\varepsilon}{2h} h + |a| \frac{\varepsilon}{2|a|} = \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

4. Plyne z 2., 3. a 1.3.5.2.

5. Podle 1. je $\lim |b_n| = |b|$ a podle předpokladu $|b| > 0$. Tedy k $\frac{|b|}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_1$ je $||b_n| - |b|| < \frac{|b|}{2}$, neboli $|b_n| > |b| - \frac{|b|}{2} = \frac{|b|}{2}$. Odtud plyne, že pro $n \geq n_1$ je $\frac{1}{|b_n|} < \frac{2}{|b|}$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\frac{b^2 \varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $|b_n - b| < \frac{b^2 \varepsilon}{2}$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ je $\left| \frac{1}{b_n} - \frac{1}{b} \right| = \frac{|b - b_n|}{|b||b_n|} < \frac{b^2 \varepsilon}{2} \frac{1}{|b|} \frac{2}{|b|} = \varepsilon$ a tedy $\lim \frac{1}{b_n} = \frac{1}{b}$.

Podle 3. je $\lim \frac{a_n}{b_n} = \lim a_n \lim \frac{1}{b_n} = a \frac{1}{b} = \frac{a}{b}$.

□

Poznamenejme, že z 1.3.6.3 a z 1.3.5.2 plyne: Jsou-li $c \in \mathbb{R}$, $\{a_n\}$ konvergentní posloupnost s $\lim a_n = a$, pak existuje $\lim(ca_n) = c \lim a_n = ca$.

1.3.7 Věta (o třech posloupnostech, o sevření)

Buďte $\{a_n\}$, $\{b_n\}$, $\{c_n\}$ posloupnosti takové, že existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_1$ je $a_n \leq b_n \leq c_n$. Jestliže $\lim a_n = \lim c_n = a$, pak také $\lim b_n = a$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K němu existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $|a_n - a| < \varepsilon$, neboli $a_n > a - \varepsilon$.

Dále existuje $n_3 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_3$ je $|c_n - a| < \varepsilon$, neboli $c_n < a + \varepsilon$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2, n_3\}$ platí $a - \varepsilon < a_n \leq b_n \leq c_n < a + \varepsilon$, neboli $a - \varepsilon < b_n < a + \varepsilon$, což znamená $\lim b_n = a$. □

1.3.8 Příklad

Pro $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$ je $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1$.

D.:

- Pro $a = 1$ plyne tvrzení z 1.3.5.2.

- Buď $a > 1$. Pak $\sqrt[n]{a} \geq 1$ pro každé $n \in \mathbb{N}$, neboli $\sqrt[n]{a} = 1 + \alpha_n$, kde $\alpha_n \geq 0$.

$$\text{Dále } a = (1 + \alpha_n)^n = 1 + n\alpha_n + \binom{n}{2} \alpha_n^2 + \dots + \binom{n}{n-1} \alpha_n^{n-1} + \alpha_n^n \geq 1 + n\alpha_n.$$

Odtud $\alpha_n \leq \frac{a-1}{n}$. Celkem $0 \leq \alpha_n \leq \frac{a-1}{n}$. Podle 1.3.5.4 je $\lim \frac{a-1}{n} = a \lim \frac{1}{n} - \lim \frac{1}{n} = 0$ a tedy podle 1.3.7 a 1.3.5.2 je $\lim \alpha_n = 0$. Podle 1.3.5.2 a 1.3.6.2 je $\lim \sqrt[n]{a} = 1 + \lim \alpha_n = 1$.

- Buď $0 < a < 1$. Pak $b = \frac{1}{a} > 1$ a tedy $\lim \sqrt[n]{b} = 1$. Avšak podle 1.3.6.5 je $1 = \lim \sqrt[n]{b} = \frac{\lim 1}{\lim \sqrt[n]{a}} = \frac{1}{\lim \sqrt[n]{a}}$, z čehož plyne $\lim \sqrt[n]{a} = 1$.

□

1.3.9 Věta (o monotonních posloupnostech)

Je-li posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ neklesající a shora ohraničená, pak je konvergentní a platí $\lim a_n = \sup\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$.
 Je-li posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ nerostoucí a zdola ohraničená, pak je konvergentní a platí $\lim a_n = \inf\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$.
 Je-li monotonní posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ ohraničená, pak je konvergentní.

D.: Bud' $\{a_n\}$ neklesající a shora ohraničená posloupnost. Podle 1.1.7(R14) existuje $a = \sup\{a_n : n \in \mathbb{N}\} \in \mathbb{R}$.
 Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. Pak $a - \varepsilon < a$ a podle 1.1.6(s2*) existuje $a_{n_0} \in \{a_n\}$ takové, že $a_{n_0} > a - \varepsilon$. Poněvadž $\{a_n\}$ je neklesající, je $a_n > a - \varepsilon$ pro každé $n \geq n_0$. Tedy pro $n \geq n_0$ je $a - \varepsilon < a_n \leq a < a + \varepsilon$, neboli $\lim a_n = a$.
 Druhé tvrzení se dokáže analogicky, třetí je důsledkem prvního a druhého. \square

1.3.10 Příklad

Posloupnost $\left\{ \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \right\}_{n=1}^{\infty}$ je rostoucí a konvergentní.

(Značíme $\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$, jest $e = 2.71828182846 \dots$)

D.: S využitím binomické věty a vztahu $\frac{l}{n+1} < \frac{l}{n}$, neboli $1 - \frac{l}{n+1} > 1 - \frac{l}{n}$ pro všechna $n, l \in \mathbb{N}$ dostaneme:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1} &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} \frac{1}{(n+1)^k} > \sum_{k=0}^n \binom{n+1}{k} \frac{1}{(n+1)^k} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{(n+1)n(n-1)\cdots(n-k+2)}{k!} \frac{1}{(n+1)^k} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{n(n-1)\cdots(n-k+2)}{k!} \frac{1}{(n+1)^{k-1}} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \frac{n}{n+1} \frac{n-1}{n+1} \cdots \frac{n-k+2}{n+1} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(1 - \frac{2}{n+1}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n+1}\right) > \\ &> \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n}\right) = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \frac{n-1}{n} \frac{n-2}{n} \cdots \frac{n-k+1}{n} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{(n-1)(n-2)\cdots(n-k+1)}{k!} \frac{1}{n^{k-1}} = \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-k+1)}{k!} \frac{1}{n^k} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{1}{n^k} = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \end{aligned}$$

To znamená, že posloupnost $\left\{ \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \right\}_{n=1}^{\infty}$ je rostoucí.

Položme $a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$. Pak $a_n \geq 0$ a s využitím nerovnosti $(1+x)^m \geq 1+mx$ pro $x \geq 0$, $m \in \mathbb{N}$ (viz. 1.3.8) dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{a_n}{a_{n+1}} &= \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+2}} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\frac{n+1}{n}}{\frac{n+2}{n+1}}\right)^{n+2} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{n^2 + 2n + 1}{n^2 + 2n}\right)^{n+2} = \\ &= \frac{n}{n+1} \left(1 + \frac{1}{n(n+2)}\right)^{n+2} \geq \frac{n}{n+1} \left(1 + \frac{n+2}{n(n+2)}\right) = \frac{n}{n+1} \frac{n+1}{n} = 1. \end{aligned}$$

Tedy $a_n \geq a_{n+1}$, posloupnost $\{a_n\}$ je nerostoucí, zdola ohraničená nulou. Podle 1.3.9 je konvergentní.

Dále podle 1.3.6.2 a 1.3.5.4 platí $\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right) = 1$ a tedy podle 1.3.6.5 existuje

$$\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \lim \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)} = \frac{\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}}{\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)} = \lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}. \quad \square$$

1.3.11 Definice

Řekneme, že posloupnost $\{a_n\}$ má *nevlastní limitu* ∞ a píšeme $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$ (stručněji $\lim a_n = \infty$, $a_n \rightarrow \infty$) jestliže ke každému $h \in \mathbb{R}$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ platí $a_n > h$.

Řekneme, že posloupnost $\{a_n\}$ má *nevlastní limitu* $-\infty$ a píšeme $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = -\infty$ (stručněji $\lim a_n = -\infty$, $a_n \rightarrow -\infty$) jestliže ke každému $h \in \mathbb{R}$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ platí $a_n < h$.

Má-li posloupnost $\{a_n\}$ nevlastní limitu, řekneme, že je *určitě divergentní*.

Nemá-li posloupnost $\{a_n\}$ limitu ani nevlastní limitu, řekneme, že je *oscilující*.

Nahradíme-li v tvrzeních 1.3.3, 1.3.5.1, 1.3.7 slovo „limita“ slovem „nevlastní limita“, zůstanou tato tvrzení v platnosti.

1.3.12 Poznámky

1. Buď $\{a_n\}$ konvergentní posloupnost, $\lim a_n = 0$. Jestliže existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_1$ je $a_n > 0$ (resp. $a_n < 0$, resp. $a_n \neq 0$), pak $\lim \frac{1}{a_n} = \infty$ (resp. $\lim \frac{1}{a_n} = -\infty$, resp. $\lim \frac{1}{|a_n|} = \infty$).

D.: Buď $h > 0$ libovolné. Poněvadž $\lim a_n = 0$, existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_2$ je $|a_n| < \frac{1}{h}$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí $\frac{1}{a_n} = \frac{1}{|a_n|} > h$, a tedy $\lim \frac{1}{a_n} = \infty$.

Druhé tvrzení se dokáže analogicky, třetí je jejich důsledkem. \square

2. Nechť $\lim a_n = \infty$ (resp. $\lim a_n = -\infty$) a nechť posloupnost $\{b_n\}$ je zdola (resp. shora) ohraničená. Pak $\lim(a_n + b_n) = \infty$ (resp. $\lim(a_n + b_n) = -\infty$).

D.: Existuje $k \in \mathbb{R}$, že $b_n > k$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. Buď $h \in \mathbb{R}$ libovolné.

Poněvadž $\lim a_n = \infty$, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ je $a_n > h - k$. Tedy pro $n \geq n_0$ je $a_n + b_n > h - k + k = h$, což znamená $\lim(a_n + b_n) = \infty$.

Druhé tvrzení se dokáže analogicky. \square

3. Nechť $\lim a_n = \infty$ a nechť $\{b_n\}$ je posloupnost taková, že existují $n_1 \in \mathbb{N}$, $\delta > 0$ taková, že pro $n \geq n_1$ je $b_n > \delta$ (resp. $b_n < -\delta$). Pak $\lim a_n b_n = \infty$ (resp. $\lim a_n b_n = -\infty$).

Nechť $\lim a_n = -\infty$ a nechť $\{b_n\}$ je posloupnost taková, že existují $n_1 \in \mathbb{N}$, $\delta > 0$ taková, že pro $n \geq n_1$ je $b_n > \delta$ (resp. $b_n < -\delta$). Pak $\lim a_n b_n = -\infty$ (resp. $\lim a_n b_n = \infty$).

D.: Buď $h \in \mathbb{R}$ libovolné. Existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $a_n > \frac{h}{\delta}$.

Pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí $a_n b_n > \frac{h}{\delta} \delta = h$, což znamená $\lim a_n b_n = \infty$.

Zbývající tvrzení se dokáží analogicky. \square

Předpoklad $b_n > \delta$ pro $n \geq n_1$ nelze zeslabit na $b_n > 0$ pro $n \geq n_1$. Například pro $\{a_n\} = \{n\}$, $\{b_n\} = \left\{\frac{1}{n^2}\right\}$ je podle 1.3.5.4 $\lim a_n b_n = \lim \frac{1}{n} = 0$.

4. Nechť $\lim |a_n| = \infty$ a $\{b_n\}$ je ohraničená posloupnost. Pak $\lim \frac{1}{a_n} = 0$ a $\lim \frac{b_n}{a_n} = 0$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ je $|a_n| > \frac{1}{\varepsilon}$, tedy $\left| \frac{1}{a_n} - 0 \right| = \left| \frac{1}{a_n} \right| = \frac{1}{|a_n|} < \varepsilon$.
Druhé tvrzení nyní plyne z 1.3.5.3. \square

5. Je-li posloupnost $\{a_n\}$ neklesající (resp. nerostoucí) a není ohraničená shora (resp. zdola), pak je určitě divergentní a $\lim a_n = \infty$ (resp. $\lim a_n = -\infty$).

D.: Buď $h \in \mathbb{R}$ libovolné.

Poněvadž $\{a_n\}$ není ohraničená shora, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $a_{n_0} > h$.

Poněvadž $\{a_n\}$ je neklesající, pro $n \geq n_0$ je $a_n \geq a_{n_0} > h$, tedy $\lim a_n = \infty$.

Druhé tvrzení se dokáže analogicky. \square

1.3.13 Definice

Nechť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost a $\{n_k\}_{k=1}^{\infty}$ je rostoucí posloupnost přirozených čísel. Posloupnost $\{a_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ se nazývá *vybraná* z posloupnosti $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Například $\{a_{2n}\} = \{a_2, a_4, a_6, \dots\}$, $\{a_{n^2}\} = \{a_1, a_4, a_9, \dots\}$, $\{a_n\}_{n=m}^{\infty} = \{a_m, a_{m+1}, a_{m+2}, \dots\}$ jsou posloupnosti vybrané z $\{a_n\}$.

Poznámka: Snadno ověříme, že posloupnost $\{a_n\}$ je rostoucí, klesající, nerostoucí, neklesající, ohraničená shora, ohraničená zdola, ohraničená, stacionární právě tehdy, když každá posloupnost $\{a_{n_k}\}$ vybraná z posloupnosti $\{a_n\}$ má stejnou vlastnost.

1.3.14 Věta

$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R}^*$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{n_k\}_{k=1}^{\infty}$ vybranou z posloupnosti $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ platí $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$.

D.:

„ \Rightarrow “ Nechť $a \in \mathbb{R}$ a buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $|a_n - a| < \varepsilon$ pro každé $n \geq n_0$.
Poněvadž $\{n_k\}_{k=1}^{\infty}$ je rostoucí posloupnost přirozených čísel, existuje $k_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $n_{k_0} \geq n_0$ a $n_k \geq n_{k_0}$ pro každé $k \geq k_0$. Tedy pro každé $k \geq k_0$ je $|a_{n_k} - a| < \varepsilon$, což znamená $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$. Pro $a = \infty$ nebo $a = -\infty$ dokážeme tvrzení analogicky.

„ \Leftarrow “ je triviální. Je-li $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$ pro každou $\{n_k\}_{k=1}^{\infty}$, platí to zejména pro $n_k = k$.

\square

1.3.15 Definice

Číslo $a \in \mathbb{R}$ nazveme *hromadným bodem posloupnosti* $\{a_n\}$, jestliže ke každému $n_0 \in \mathbb{N}$ a každému $\varepsilon > 0$ existuje $n \geq n_0$ takové, že $|a_n - a| < \varepsilon$.

a je hromadným bodem posloupnosti $\{a_n\}$ právě tehdy, když existuje nekonečně mnoho indexů $m \in \mathbb{N}$ takových, že $|a_m - a| < \varepsilon$ pro každé $\varepsilon > 0$.

Například posloupnost $\{(-1)^n\} = \{-1, 1, -1, 1, -1, \dots\}$ má dva hromadné body -1 a 1 .

1.3.16 Věta

Číslo $a \in \mathbb{R}$ je hromadným bodem posloupnosti $\{a_n\}$ právě tehdy, když existuje posloupnost $\{a_{n_k}\}$ vybraná z posloupnosti $\{a_n\}$, která konverguje k číslu a .

D.: „ \Rightarrow “ Nechť a je hromadným bodem posloupnosti $\{a_n\}$.

K $\varepsilon_1 = 1$, $n_0 = 1$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, $n_1 \geq 1$ takové, že $|a_{n_1} - a| < 1$.

K $\varepsilon_2 = \frac{1}{2}$ a k $n_1 + 1 \in \mathbb{N}$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, $n_2 > n_1$ takové, že $|a_{n_2} - a| < \frac{1}{2}$.

K $\varepsilon_3 = \frac{1}{3}$ a k $n_2 + 1 \in \mathbb{N}$ existuje $n_3 \in \mathbb{N}$, $n_3 > n_2$ takové, že $|a_{n_3} - a| < \frac{1}{3}$.

Tímto způsobem postupujeme dále. Výsledkem konstrukce je rostoucí posloupnost přirozených čísel $\{n_k\}$ takových, že $|a_{n_k} - a| < \frac{1}{k}$.

Poněvadž $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} = 0$, ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $k_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $|\frac{1}{k} - 0| = \frac{1}{k} < \varepsilon$ pro každé $k \geq k_0$.

Tedy pro $k \geq k_0$ platí $|a_{n_k} - a| < \frac{1}{k} < \varepsilon$, což znamená $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$.

„ \Leftarrow “ Jestliže existuje $\{a_{n_k}\}$ taková, že $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a$, pak ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $k_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $k \geq k_0$ — tedy pro nekonečně mnoho indexů k — platí $|a_{n_k} - a| < \varepsilon$, což znamená, že a je hromadným bodem posloupnosti $\{a_n\}$. \square

Z 1.3.14 plyne: Je-li $\lim a_n = a \in \mathbb{R}$, pak a je jediným hromadným bodem posloupnosti $\{a_n\}$.

1.3.17 Lemma

Buď $\{a_n\}$ posloupnost a M množina hromadných bodů této posloupnosti. Nechť $M \neq \emptyset$. Je-li M shora (resp. zdola) ohraničená, pak existuje $\max M$ (resp. $\min M$).

D.: Podle 1.1.7(R14) existuje $a = \sup M$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Pak $a - \varepsilon < a$ a podle 1.1.6(s2*) existuje hromadný bod $m \in M$ takový, že $m > a - \varepsilon$. Tedy $\varepsilon_1 = m - a + \varepsilon > 0$.

Dále $m - \varepsilon_1 = m - (m - a + \varepsilon) = a - \varepsilon$, $m + \varepsilon_1 = m + (m - a + \varepsilon) \leq a + a - a + \varepsilon = a + \varepsilon$, neboť $a = \sup M \geq m$. Odtud plyne, že $(m - \varepsilon_1, m + \varepsilon_1) \subseteq (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$.

Podle definice hromadného bodu leží v $(m - \varepsilon_1, m + \varepsilon_1)$ nekonečně mnoho členů posloupnosti $\{a_n\}$, tedy i v $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ leží nekonečně mnoho členů posloupnosti $\{a_n\}$, což znamená, že a je hromadný bod posloupnosti $\{a_n\}$, $a \in M$ a tedy podle 1.1.6.4 $a = \max M$.

Druhá část tvrzení se dokáže analogicky. \square

1.3.18 Věta (Bolzano [1781 – 1848], Weierstrass [1815 – 1897])

Každá ohraničená posloupnost má alespoň jeden hromadný bod.

D.: Buď $\{a_n\}$ ohraničená posloupnost, $h \leq a_n \leq H$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

Položme $M_k = \{a_n : n > k\}$. $M_k \neq \emptyset$, M_k je shora ohraničená (H je její horní závora). Existuje tedy $b_k = \sup M_k$. Zřejmě $b_k \geq h$ pro každé $k \in \mathbb{N}$ a poněvadž $M_k \supseteq M_{k+1}$, platí $b_k \geq b_{k+1}$. Tedy posloupnost $\{b_k\}_{k=1}^{\infty}$ je nerostoucí a zdola ohraničená. Podle 1.3.9 je $\{b_k\}_{k=1}^{\infty}$ konvergentní, $\lim_{k \rightarrow \infty} b_k = b$.

Ukážeme, že b je hromadný bod posloupnosti $\{a_n\}$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $k_0 \in \mathbb{N}$, že pro každé $k \geq k_0$ jest $|b_k - b| < \varepsilon$, neboli $b_k < b + \varepsilon$. Pro $k \geq k_0$ je také $b_k = \sup\{a_n : n \geq k\} \geq a_k$. Celkem $a_k \leq b_k < b + \varepsilon$.

Připustíme, že b není hromadný bod posloupnosti $\{a_n\}$. Pak v intervalu $(b - \varepsilon, b + \varepsilon)$ leží pouze konečný počet členů této posloupnosti. To vzhledem k poslední nerovnosti znamená, že existuje $n_0 \geq k_0$ takové, že pro $k \geq n_0$ je $a_k \leq b - \varepsilon$. Tedy i $b_k = \sup\{a_n : n \geq k\} \leq b - \varepsilon$.

Podle 1.3.5.1 je $b = \lim_{k \rightarrow \infty} b_k \leq b - \varepsilon$, což je spor. \square

1.3.19 Důsledky

1. Z každé ohraničené posloupnosti lze vybrat posloupnost konvergentní.

D.: plyne z 1.3.16. \square

2. Je-li množina hromadných bodů posloupnosti prázdná, je posloupnost neohraničená.

1.3.20 Definice

Buď $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost a M množina jejích hromadných bodů.

- Nechť $M \neq \emptyset$. Je-li posloupnost $\{a_n\}$ ohraničená shora, klademe $\limsup a_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n = \max M$, je-li $\{a_n\}$ ohraničená zdola, klademe $\liminf a_n = \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n = \min M$. Není-li $\{a_n\}$ ohraničená shora, klademe $\limsup a_n = \infty$, není-li $\{a_n\}$ ohraničená zdola, klademe $\liminf a_n = -\infty$.
- Nechť $M = \emptyset$. Je-li posloupnost $\{a_n\}$ ohraničená shora, klademe $\limsup a_n = \liminf a_n = -\infty$, je-li $\{a_n\}$ ohraničená zdola, klademe $\limsup a_n = \liminf a_n = \infty$. Není-li $\{a_n\}$ ohraničená shora ani zdola, klademe $\limsup a_n = \infty$, $\liminf a_n = -\infty$.

Číslo $\limsup a_n$ se nazývá *limes superior posloupnosti* $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$, číslo $\liminf a_n$ se nazývá *limes inferior posloupnosti* $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Stručně: $\limsup a_n$ je největší hromadný bod posloupnosti $\{a_n\}$, pokud je tato posloupnost ohraničená shora,
 $\liminf a_n$ je nejmenší hromadný bod posloupnosti $\{a_n\}$, pokud je tato posloupnost ohraničená zdola.

1.3.17 ukazuje, že definice je korektní.

Analogickou úvahou jako v důkazu věty 1.3.18 lze ukázat, že

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow \infty} a_n &= \lim_{k \rightarrow \infty} (\sup\{a_n : n > k\}), \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} a_n &= \lim_{k \rightarrow \infty} (\inf\{a_n : n > k\}). \end{aligned}$$

Zřejmě platí: $\liminf a_n \leq \limsup a_n$. $\liminf a_n = \limsup a_n$ právě tehdy, když existuje vlastní nebo nevlastní limita $\lim a_n$.

1.3.21 Definice

Posloupnost $\{a_n\}$ se nazývá *cauchyovská*, jestliže ke každému $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ a každé $m \geq n_0$ platí $|a_m - a_n| < \varepsilon$.

1.3.22 Věta (Cauchyovo – Bolzanovo kritérium konvergence)

Posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je konvergentní právě tehdy, když je cauchyovská.

D.:

„ \Rightarrow “ Nechť $\{a_n\}$ je konvergentní, $\lim a_n = a$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ je $|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$ a pro $m \geq n_0$ je $|a_m - a| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Tedy pro $n \geq n_0$ a $m \geq n_0$ platí $|a_m - a_n| = |a_m - a + a - a_n| \leq |a_m - a| + |a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$.

„ \Leftarrow “ Nechť $\{a_n\}$ je cauchyovská. K číslu 1 existuje \tilde{n} takové, že pro $n \geq \tilde{n}$ platí $|a_n - a_{\tilde{n}}| < 1$, tedy $a_{\tilde{n}} - 1 < a_n < a_{\tilde{n}} + 1$.

Položme $h = \min\{a_1, a_2, \dots, a_{\tilde{n}-1}, a_{\tilde{n}} - 1\}$, $H = \max\{a_1, a_2, \dots, a_{\tilde{n}-1}, a_{\tilde{n}} + 1\}$. Pak pro každé $n \in \mathbb{N}$ je $h \leq a_n \leq H$, tedy $\{a_n\}$ je ohraničená a podle 1.3.19.1 existuje vybraná posloupnost $\{a_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ taková, že $\lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = a \in \mathbb{R}$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\frac{\varepsilon}{2}$ existuje $k_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $k \geq k_0$ je $|a_{n_k} - a| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Současně existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $m, n \geq n_0$ je $|a_m - a_n| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Buď $n \geq n_0$ libovolné. Zvolme $k_1 \geq k_0$ takové, že $n_{k_1} \geq n_0$. Pak

$|a_n - a| = |a_n - a_{n_{k_1}} + a_{n_{k_1}} - a| \leq |a_n - a_{n_{k_1}}| + |a_{n_{k_1}} - a| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$,

tedy $\lim a_n = a$.

□

1.4 Elementární funkce

A. Polynomy

1.4.1 Definice

Budte $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$, $a_n \neq 0$. *Polynom (racionální funkce celistvá)* je funkce tvaru $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$.

Číslo n se nazývá *stupeň polynomu*, značíme $n = \text{st } P$.

Čísla a_0, a_1, \dots, a_n se nazývají *koefficienty polynomu*.

Je-li $\text{st } P = 1$, polynom se nazývá *lineární*.

Je-li $\text{st } P = 2$, polynom se nazývá *kvadratický*.

Je-li $\text{st } P = 3$, polynom se nazývá *kubický*.

Je-li $\text{st } P = 4$, polynom se nazývá *bikvadratický*.

Číslo 0 nazveme *nulovým polynomem*. Nepřirazujeme mu stupeň.

$$\text{Dom } P = \mathbb{R}, \text{ Im } P = \begin{cases} (-\infty, \infty), & \text{st } P \text{ je lichý} \\ [a, \infty), & \text{st } P \text{ je sudý, } a_n > 0 \\ (-\infty, a], & \text{st } P \text{ je sudý, } a_n < 0 \end{cases}$$

Komplexní čísla: $\mathbb{C} = \{a + ib : a, b \in \mathbb{R}\}$, kde $i^2 = -1$

$$(a_1 + ib_1) + (a_2 + ib_2) = (a_1 + a_2) + i(b_1 + b_2)$$

$$(a_1 + ib_1) \cdot (a_2 + ib_2) = (a_1 a_2 - b_1 b_2) + i(a_2 b_1 + a_1 b_2)$$

Je-li $\alpha = a + ib \in \mathbb{C}$, $\beta \in \mathbb{C}$ pak

$$\bar{\alpha} = a - ib \quad \text{— číslo komplexně sdružené (konjugované)}$$

$$|\alpha| = \sqrt{\alpha \bar{\alpha}} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{— absolutní hodnota (modul) komplexního čísla}$$

$$\alpha + \beta = \bar{\alpha} + \bar{\beta}$$

$$\alpha \beta = \bar{\alpha} \bar{\beta}$$

$$\alpha^n = \bar{\alpha}^n \text{ pro } n \in \mathbb{N}$$

$$\alpha \in \mathbb{R} \Leftrightarrow b = 0 \Leftrightarrow \alpha = \bar{\alpha}$$

Množina komplexních čísel s operacemi $+$, \cdot splňuje (R1) – (R9) z 1.1.7. Tvoří tedy pole. Toto pole nelze uspořádat.

1.4.2 Definice

Číslo $\alpha \in \mathbb{C}$ se nazývá *kořen (nulový bod)* polynomu P , jestliže platí $P(\alpha) = 0$.

Je-li α kořenem polynomu P , pak lineární polynom $x - \alpha$ nazveme *kořenovým faktorem* polynomu P .

1.4.3 Základní věta algebry

Každý polynom stupně $n \geq 1$ s komplexními koeficienty má komplexní kořen.

Tato věta je známá od 17. století. První (chybný) pokus o důkaz publikoval d'Alembert roku 1746, větu dokázal Gauss roku 1799.

1.4.4 Věta

Buď $P(x)$ polynom, $\text{st } P = n \geq 1$. Číslo $\alpha \in \mathbb{C}$ je kořenem polynomu P právě tehdy, když existuje polynom Q , $\text{st } Q = n - 1$ takový, že $P(x) = (x - \alpha)Q(x)$.

D.:

„ \Rightarrow “ Nechť $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$, α je kořenem P . Pak

$$\begin{aligned} P(x) &= P(x) - 0 = P(x) - P(\alpha) = \\ &= a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 - (a_n \alpha^n + a_{n-1} \alpha^{n-1} + \dots + a_1 \alpha + a_0) = \\ &= a_n (x^n - \alpha^n) + a_{n-1} (x^{n-1} - \alpha^{n-1}) + \dots + a_1 (x - \alpha) + a_0 (1 - 1). \end{aligned}$$

Pro každé $k \in \mathbb{N}$ platí $(x^k - \alpha^k) : (x - \alpha) = x^{k-1} + x^{k-2}\alpha + x^{k-3}\alpha^2 + \dots + x\alpha^{k-2} + \alpha^{k-1}$. Tedy $P(x) = a_n(x-\alpha)(x^{n-1} + x^{n-2}\alpha + \dots + \alpha^{n-1}) + a_{n-1}(x-\alpha)(x^{n-2} + x^{n-3}\alpha + \dots + \alpha^{n-2}) + \dots + a_1(x-\alpha)$. Označíme $Q(x) = a_n(x^{n-1} + x^{n-2}\alpha + \dots + \alpha^{n-1}) + a_{n-1}(x^{n-2} + x^{n-3}\alpha + \dots + \alpha^{n-2}) + \dots + a_1$ a dostaneme tvrzení.

„ \Leftarrow “ je zřejmé.

□

$P(x)$, st $P = n \geq 1$. Podle 1.4.3 má P kořen α_1 , a tedy $P(x) = (x - \alpha_1)Q_1(x)$.

Je-li st $Q_1 \geq 1$, pak $Q_1(x) = (x - \alpha_2)Q_2(x)$, tedy $P(x) = (x - \alpha_1)(x - \alpha_2)Q_2(x)$.

Analogicky pokračujeme a po n krocích dostaneme $P(x) = a_n(x - \alpha_1)(x - \alpha_2) \dots (x - \alpha_n)$.

Může se stát, že $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k$, $k \leq n$. Pak $(x - \alpha_1)(x - \alpha_2) \dots (x - \alpha_k) = (x - \alpha_1)^k$. Celkem $P(x) = a_n(x - \alpha_1)^{k_1}(x - \alpha_2)^{k_2} \dots (x - \alpha_m)^{k_m}$, přičemž $k_1, k_2, \dots, k_m \in \mathbb{N}$, $k_1 + k_2 + \dots + k_m = n$.

1.4.5 Definice

Číslo $\alpha \in \mathbb{C}$ se nazývá *k-násobný kořen* polynomu $P(x)$, jestliže $P(x) = (x - \alpha)^k Q(x)$, kde $Q(x)$ je polynom nemající kořen α .

(1-násobný kořen se nazývá *jednoduchý*.)

1.4.6 Věta (o rozkladu polynomu na kořenové faktory)

Nechť $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ je polynom, st $P = n \geq 1$. Nechť $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ jsou všechny jeho navzájem různé kořeny, přičemž α_1 je k_1 -násobný, α_2 je k_2 -násobný, \dots , α_m je k_m -násobný. Pak

$$P(x) = a_n(x - \alpha_1)^{k_1}(x - \alpha_2)^{k_2} \dots (x - \alpha_m)^{k_m},$$

$$k_1, k_2, \dots, k_m \in \mathbb{N}, k_1 + k_2 + \dots + k_m = n.$$

Důsledek: Polynom stupně n má právě n kořenů, jestliže k -násobný kořen počítáme k krát.

1.4.7 Příklad

$$\begin{aligned} P(x) &= x^5 + x^4 + x^3 - x^2 - x - 1 = x^3(x^2 + x + 1) - (x^2 + x + 1) = (x^3 - 1)(x^2 + x + 1) = \\ &= (x - 1)(x^2 + x + 1)(x^2 + x + 1) = (x - 1) \left(x - \left(-\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)^2 \left(x - \left(-\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)^2 \end{aligned}$$

1.4.8 Věta

Nechť polynom $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ má reálné koeficienty a komplexní kořen α . Pak má také komplexně sdružený kořen $\bar{\alpha}$ a násobnosti kořenů α a $\bar{\alpha}$ jsou stejné.

D.: Pro $x \in \mathbb{R}$ je $\bar{x} = x$ a tedy $\overline{P(x)} = \bar{a}_n \bar{x}^n + \bar{a}_{n-1} \bar{x}^{n-1} + \dots + \bar{a}_0 = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0 = P(x)$.

Podle 1.4.6 je $P(x) = a_n(x - \alpha_1)^{k_1}(x - \alpha_2)^{k_2} \dots (x - \alpha_m)^{k_m}$ a tedy

$\overline{P(x)} = a_n(x - \bar{\alpha}_1)^{k_1}(x - \bar{\alpha}_2)^{k_2} \dots (x - \bar{\alpha}_m)^{k_m}$. Z rovnosti $\overline{P(x)} = P(x)$ plyne tvrzení. □

Polynom s reálnými koeficienty se nazývá *reálný polynom*.

1.4.9 Věta (o rozkladu reálného polynomu v reálném oboru na ireducibilní polynomy)

Bud' $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ reálný polynom, st $P = n \geq 1$. Nechť $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ jsou všechny jeho reálné kořeny, přičemž α_1 je k_1 -násobný, \dots , α_m je k_m -násobný. Nechť $a_1 \pm ib_1, a_2 \pm ib_2, \dots, a_r \pm ib_r$ jsou všechny jeho imaginární kořeny, přičemž $a_1 \pm ib_1$ je l_1 -násobný, \dots , $a_r \pm ib_r$ je l_r násobný. Pak je

$$P(x) = a_n(x - \alpha_1)^{k_1}(x - \alpha_2)^{k_2} \dots (x - \alpha_m)^{k_m} [(x - a_1)^2 + b_1^2]^{l_1} [(x - a_2)^2 + b_2^2]^{l_2} \dots [(x - a_r)^2 + b_r^2]^{l_r},$$

$$k_1 + k_2 + \dots + k_m + 2l_1 + 2l_2 + \dots + 2l_r = n.$$

D.: Podle 1.4.6 a 1.4.8 v rozkladu polynomy $P(x)$ vystupuje součin faktorů
 $(x - (a_j + ib_j))^{l_j} (x - (a_j - ib_j))^{l_j} = (x^2 - (a_j + ib_j)x - (a_j - ib_j)x + (a_j + ib_j)(a_j - ib_j))^{l_j} =$
 $= (x^2 - 2a_jx + a_j^2 + b_j^2 + i(a_jb_j - a_jb_j))^{l_j} = (x^2 - 2a_jx + a_j^2 + b_j^2)^{l_j} = [(x - a_j)^2 + b_j^2]^{l_j}. \square$

Faktory $(x - a_j)^2 + b_j^2$ se někdy nahrazují kvadratickým polynomem $x^2 + p_jx + q_j$ se záporným diskriminantem $p_j^2 - 4q_j$.

1.4.10 Příklad

Viz též 1.4.7.

$$x^5 + x^4 + x^3 - x^2 - x - 1 = (x - 1) \left(x - \left(-\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)^2 \left(x - \left(-\frac{1}{2} - i\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)^2 = (x - 1) \left(\left(x + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{3}{4} \right)^2$$

nebo $x^5 + x^4 + x^3 - x^2 - x - 1 = (x - 1)(x^2 + x + 1)^2$.

B. Racionální funkce

1.4.11 Definice

Buďte $P(x)$, $Q(x)$ nenulové polynomy. Funkce $R(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$ se nazývá *racionální lomená funkce*.

Je-li $\text{st } P < \text{st } Q$, funkce R se nazývá *ryze lomená*; je-li $\text{st } P \geq \text{st } Q$, funkce R se nazývá *neryze lomená*.

$\text{Dom } R = \mathbb{R} \setminus \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$, kde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ jsou všechny reálné kořeny polynomu $Q(x)$.

Je-li $R(x)$ neryze lomená, lze provést naznačené dělení. Výsledkem je polynom $S(x)$ a zbytek — polynom $T(x)$, který je buď nulový nebo $\text{st } T < \text{st } Q$. Tedy $R(x) = S(x)$ nebo $R(x) = S(x) + \frac{T(x)}{Q(x)}$. Odtud plyne, že platí

1.4.12 Poznámka

Neryze lomená funkce je buď polynomem nebo ji lze vyjádřit jako součet polynomu a ryze lomené funkce.

1.4.13 Lemma

Buď $R(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$ ryze lomená racionální funkce a nechtě α je reálný k -násobný kořen polynomu $Q(x)$, tj. $Q(x) = (x - \alpha)^k Q_1(x)$, $Q_1(\alpha) \neq 0$. Pak existují reálná čísla a_1, a_2, \dots, a_k taková, že pro všechna $x \in \text{Dom } R$ platí

$$R(x) = \frac{P(x)}{(x - \alpha)^k Q_1(x)} = \frac{a_k}{(x - \alpha)^k} + \frac{a_{k-1}}{(x - \alpha)^{k-1}} + \dots + \frac{a_2}{(x - \alpha)^2} + \frac{a_1}{x - \alpha} + \frac{P_1(x)}{Q_1(x)},$$

kde $P_1(x)$ je buď nulový polynom, nebo $\text{st } P_1 < \text{st } Q_1$.

D.: Pro každé $a \in \mathbb{R}$ je $\frac{P(x)}{(x - \alpha)^k Q_1(x)} = \frac{a}{(x - \alpha)^k} + \frac{P(x) - aQ_1(x)}{(x - \alpha)^k Q_1(x)}$.

Položme $a = a_k = \frac{P(\alpha)}{Q_1(\alpha)}$. Pak $P(\alpha) - a_k Q_1(\alpha) = 0$.

Je-li $P(x) - a_k Q_1(x)$ nulový polynom, tvrzení platí.

Nechtě $P(x) - a_k Q_1(x)$ není nulový. Pak α je jeho kořen a podle 1.4.4 je $P(x) - a_k Q_1(x) = (x - \alpha)P_k(x)$,

$$\frac{P(x)}{(x - \alpha)^k Q_1(x)} = \frac{a_k}{(x - \alpha)^k} + \frac{P_k(x)}{(x - \alpha)^{k-1} Q_1(x)}.$$

Stejný postup aplikujeme na racionální funkci $\frac{P_k(x)}{(x - \alpha)^{k-1} Q_1(x)}$ a po k krocích dostaneme tvrzení. \square

1.4.14 Lemma

Buď $R(x) = \frac{P(x)}{Q(x)}$ ryze lomená racionální funkce a necht' $\alpha = a + ib$ je imaginární r -násobný kořen polynomu $Q(x)$, tj. $Q(x) = [(x-a)^2 + b^2]^r Q_1(x)$, $Q_1(a+ib) \neq 0$. Pak existují reálná čísla $m_1, n_1, m_2, n_2, \dots, m_r, n_r$, taková, že pro všechna $x \in \text{Dom } R$ platí

$$\begin{aligned} R(x) &= \frac{P(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^r Q_1(x)} = \\ &= \frac{m_r x + n_r}{[(x-a)^2 + b^2]^r} + \frac{m_{r-1} x + n_{r-1}}{[(x-a)^2 + b^2]^{r-1}} + \dots + \frac{m_2 x + n_2}{[(x-a)^2 + b^2]^2} + \frac{m_1 x + n_1}{(x-a)^2 + b^2} + \frac{P_1(x)}{Q_1(x)}, \end{aligned}$$

kde $P_1(x)$ je buď nulový polynom, nebo $\text{st } P_1 < \text{st } Q_1$.

D.: Pro každá dvě $m, n \in \mathbb{R}$ je $\frac{P(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^r Q_1(x)} = \frac{mx + n}{[(x-a)^2 + b^2]^r} + \frac{P(x) - (mx+n)Q_1(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^r Q_1(x)}$.

Necht' $\frac{P(\alpha)}{Q_1(\alpha)} = \frac{P(a+ib)}{Q_1(a+ib)} = p + iq$. Položme $m = m_r = \frac{q}{b}$, $n = n_r = \frac{pb - qa}{b}$. Pak je

$$\begin{aligned} P(\alpha) - (m_r \alpha + n_r) Q_1(\alpha) &= P(\alpha) - \left(\frac{q}{b} \alpha + i \frac{q}{b} b + p - \frac{qa}{b} \right) Q_1(\alpha) = P(\alpha) - (p + iq) Q_1(\alpha) = \\ &= P(\alpha) - \frac{P(\alpha)}{Q_1(\alpha)} Q_1(\alpha) = 0. \end{aligned}$$

Je-li $P(x) - (m_r x + n_r) Q_1(x)$ nulový polynom, tvrzení platí.

Necht' $P(x) - (m_r x + n_r) Q_1(x)$ není nulový. Pak je číslo α jeho kořenem. Podle 1.4.8 je také $\bar{\alpha}$ jeho kořenem a $P(x) - (m_r x + n_r) Q_1(x) = (x-\alpha)(x-\bar{\alpha}) P_r(x) = [(x-a)^2 + b^2] P_r(x)$,

$$\frac{P(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^r Q_1(x)} = \frac{m_r x + n_r}{[(x-a)^2 + b^2]^r} + \frac{P_r(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^{r-1}}.$$

Stejný postup aplikujeme na racionální funkci $\frac{P_r(x)}{[(x-a)^2 + b^2]^{r-1}}$ a po r krocích obdržíme tvrzení. \square

Zlomky tvaru $\frac{a}{(x-\alpha)^k}$, $\frac{mx+n}{[(x-a)^2 + b^2]^r - 1}$ nazýváme *parciální zlomky*.

Z 1.4.13 a 1.4.14 plyne

1.4.15 Věta (o rozkladu racionální funkce na parciální zlomky)

Každou ryze lomenou racionální funkci lze rozložit na součet parciálních zlomků. Každému reálnému k -násobnému kořenu α jmenovatele odpovídá skupina zlomků

$$\frac{a_k}{(x-\alpha)^k} + \frac{a_{k-1}}{(x-\alpha)^{k-1}} + \dots + \frac{a_2}{(x-\alpha)^2} + \frac{a_1}{x-\alpha}$$

a každému imaginárnímu r -násobnému kořenu $a+ib$ jmenovatele odpovídá skupina zlomků

$$\frac{m_r x + n_r}{[(x-a)^2 + b^2]^r} + \frac{m_{r-1} x + n_{r-1}}{[(x-a)^2 + b^2]^{r-1}} + \dots + \frac{m_2 x + n_2}{[(x-a)^2 + b^2]^2} + \frac{m_1 x + n_1}{(x-a)^2 + b^2}.$$

1.4.16 Poznámka

Koeficienty v rozkladu racionální funkce lze vypočítat postupem naznačeným v důkazech pomocných vět 1.4.13 a 1.4.14. V praxi se však používá *metoda neurčitých koeficientů*:

Napišeme formální tvar rozkladu se zatím neurčenými konstantami. Celou rovnost vynásobíme polynomem $Q(x)$. Tím obdržíme rovnost mezi polynomy platnou pro všechna x s výjimkou kořenů $Q(x)$. Porovnáním určitých koeficientů na levé straně a neurčitých koeficientů na pravé straně obdržíme rovnice pro neznámé konstanty.

Do zmíněné rovnosti mezi polynomy lze též dosazovat konkrétní reálná nebo komplexní čísla. Výhodné je například dosazování reálných kořenů jmenovatele $Q(x)$.

Příklad: Rozložte na parciální zlomky funkci $\frac{3x^2 - 5x + 8}{x^3 - 2x^2 + x - 2}$.

Ř.: Rozklad jmenovatele: $x^3 - 2x^2 + x - 2 = x^2(x - 2) + x - 2 = (x^2 + 1)(x - 2)$
 Formální tvar rozkladu: $\frac{3x^2 - 5x + 8}{x^3 - 2x^2 + x - 2} = \frac{A}{x - 2} + \frac{Bx + C}{x^2 + 1}$
 $\frac{3x^2 - 5x + 8}{3x^2 - 5x + 8} = \frac{A(x^2 + 1) + (Bx + C)(x - 2)}{3x^2 - 5x + 8} = \frac{(A + B)x^2 + (C - 2B)x + (A - 2C)}{3x^2 - 5x + 8}$
 Dosadíme $x = 2$: $12 - 10 + 8 = A \cdot 5 \rightarrow A = 2$
 Koeficient u x^0 : $8 = A - 2C \rightarrow C = \frac{A - 8}{2} = -3$
 Koeficient u x^2 : $3 = A + B \rightarrow B = 3 - A = 1$.
 Celkem: $\frac{3x^2 - 5x + 8}{x^3 - 2x^2 + x - 2} = \frac{2}{x - 2} + \frac{x - 3}{x^2 + 1}$. \square

C. Funkce exponenciální a logaritmická

Jde o zavedení obecné mocniny a^x pro $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $x \in \mathbb{R}$.

$$x = n \in \mathbb{N} : a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n \text{ krát}}$$

$$x = \frac{1}{n} \in \mathbb{Q} : a^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{a} \text{ je číslo splňující } \left(a^{\frac{1}{n}}\right)^n = a;$$

$$x = 0 : a^0 = 1;$$

$$x = \frac{m}{n} \in \mathbb{Q} : a^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{a^m} = (\sqrt[n]{a})^m$$

$$x = -n \in \mathbb{Z} : a^{-n} = \frac{1}{a^n}$$

Pro všechna $x, y \in \mathbb{Q}$, $a > 0$ platí:

$$a^x \cdot a^y = a^{x+y}$$

$$\frac{a^x}{a^y} = a^{x-y}$$

$$(a^x)^y = a^{xy}$$

$$a > 1, x < y \Rightarrow a^x < a^y$$

$$0 < a < 1, x < y \Rightarrow a^x > a^y$$

Poznamenejme, že podle 1.1.17 ke každému $x \in \mathbb{R}$ existuje posloupnost racionálních čísel $\{x_n\}$ s $\lim x_n = x$.

1.4.17 Lemma

Buď $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $x \in \mathbb{R}$. Je-li $\{x_n\}$ libovolná posloupnost racionálních čísel taková, že $\lim x_n = x$, pak existuje $\lim a^{x_n} = \alpha \in \mathbb{R}$. Při tom je $\alpha > 0$ a α nezávisí na volbě posloupnosti $\{x_n\}$.

D: • Nechtě $a > 1$. Buď $\{x_n\}$ neklesající posloupnost racionálních čísel s limitou x .

Z $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \dots$ plyne $a^{x_1} \leq a^{x_2} \leq a^{x_3} \dots$ a tedy $\{a^{x_n}\}$ je neklesající.

Buď $t \in \mathbb{Q}$, $t \geq x$. Pak $t \geq x_n$ pro každé n a tedy $a^t \geq a^{x_n}$ pro každé n , což znamená, že $\{a^{x_n}\}$ je shora ohraničená a tedy podle 1.3.4 existuje $\lim a^{x_n} = \alpha \in \mathbb{R}$, $\alpha \geq a^{x_n} > 0$.

Buď $\{y_n\}$ libovolná posloupnost racionálních čísel s limitou x .

Položíme $z_n = y_n - x_n$. Pak $y_n = z_n + x_n$ a podle 1.3.6 je $\lim z_n = \lim y_n - \lim x_n = x - x = 0$,

$a^{y_n} = a^{z_n + x_n} = a^{z_n} a^{x_n}$. Ukážeme, že $\lim a^{z_n} = 1$:

Podle 1.3.8 je $\lim \sqrt[n]{a} = \lim a^{\frac{1}{n}} = 1$. Tedy $\lim a^{-\frac{1}{n}} = \lim \frac{1}{a^n} = 1$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Pak existuje

$n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_1$ je $1 - \varepsilon < a^{\frac{1}{n}} < 1 + \varepsilon$, a existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ je $1 - \varepsilon < a^{-\frac{1}{n}} < 1 + \varepsilon$.

Tedy pro $m = \max\{n_1, n_2\}$ platí $1 - \varepsilon < a^{-\frac{1}{m}} < 1 < a^{\frac{1}{m}} < 1 + \varepsilon$.

Poněvadž $\lim z_n = 0$, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ je $-\frac{1}{m} < z_n < \frac{1}{m}$ a tedy

$1 - \varepsilon < a^{-\frac{1}{m}} < a^{z_n} < a^{\frac{1}{m}} < 1 + \varepsilon$, což znamená, že $\lim a^{z_n} = 1$.

• Nechtě $a = 1$. Tvrzení je triviální, neboť $1^{x_n} = 1$ pro každé $x_n \in \mathbb{Q}$.

• Nechtě $0 < a < 1$. Pak $b = \frac{1}{a} > 1$. Je-li $\{x_n\}$ libovolná posloupnost racionálních čísel s limitou x , pak podle první části důkazu existuje $\beta = \lim b^{x_n}$, přičemž $\beta > 0$ a β nezávisí na volbě posloupnosti $\{x_n\}$. Podle

1.3.6.5 existuje $\lim a^{x_n} = \lim \frac{1}{b^{x_n}} = \frac{1}{\beta}$. \square

1.4.18 Definice

Bud' $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$. Exponenciální funkce $f(x) = a^x$ je definována pro každé $x \in \mathbb{R}$ předpisem $a^x = \lim a^{x_n}$, kde $\{x_n\}$ je libovolná posloupnost racionálních čísel s limitou x .

1.4.19 Věta

Nechť $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $a \neq 1$. Exponenciální funkce $f(x) = a^x$ má vlastnosti:

1. $\text{Dom } f = \mathbb{R}$, $\text{Im } f \subseteq (0, \infty)$.
2. Pro každá dvě $x, y \in \mathbb{R}$ platí: $a^x a^y = a^{x+y}$,

$$\frac{a^x}{a^y} = a^{x-y},$$

$$(a^x)^y = a^{xy}.$$
3. Pro $a > 1$ je rostoucí, pro $0 < a < 1$ je klesající.

D: 1. Plyne přímo z definice a z 1.4.17.

2. Tvzení platí pro $x, y \in \mathbb{Q}$. Nechť $x, y \in \mathbb{R}$ a $\{x_n\}, \{y_n\} \subseteq \mathbb{Q}$ takové, že $x_n \rightarrow x$, $y_n \rightarrow y$.
 $a^x a^y = \lim a^{x_n} \lim a^{y_n} = \lim a^{x_n} a^{y_n} = \lim a^{x_n + y_n} = a^{x+y}$, neboť $\lim(x_n + y_n) = x + y$.

$\frac{a^x}{a^y} = a^{x-y}$ analogicky.

$y = n \in \mathbb{N}$: $(a^x)^y = (a^x)^n = \underbrace{a^x \cdot a^x \cdot \dots \cdot a^x}_{n \text{ krát}} = a^{x+x+\dots+x} = a^{nx}$

$y = -n \in \mathbb{Z}$: $(a^x)^y = (a^x)^{-n} = \frac{1}{(a^x)^n} = \frac{1}{a^{nx}} = a^{-nx} = a^{xy}$

$y = \frac{m}{n} \in \mathbb{Q}$: $(a^x)^{\frac{m}{n}} = \sqrt[n]{(a^x)^m} = \sqrt[n]{a^{xm}}$
 současně $(a^{xy})^n = (a^{\frac{xm}{n}})^n = a^{xm} \Rightarrow \sqrt[n]{a^{xm}} = a^{xy}$,
 takže $a^{xy} = (a^x)^{\frac{m}{n}} = (a^x)^y$.

$y \in \mathbb{I}$: zvolme $\{y_n\} \subseteq \mathbb{Q}$, $y_n \rightarrow y$. Pak $(a^x)^y = \lim (a^x)^{y_n} = \lim a^{xy_n} = a^{xy}$

podle 1.4.20 (tuto poznámku totiž můžeme považovat v této chvíli již za dokázanou, neboť v jejím důkazu je využit pouze první vztah z části 2., který je již dokázán), neboť $\lim xy_n = x \lim y_n = xy$.

3. Nechť $a > 1$, $x, y \in \mathbb{R}$, $x < y$. Zvolme $u, v \in \mathbb{Q}$, $x \leq u < v \leq y$. Platí $a^u < a^v$.

Bud' $\{x_n\}$ neklesající posloupnost racionálních čísel s limitou x a bud' $\{y_n\}$ nerostoucí posloupnost racionálních čísel s limitou y . Pak

$x_n \leq x \leq u$, což znamená, že $a^{x_n} \leq a^u$ a tedy $\lim a^{x_n} = a^x \leq u$.

$v \leq y \leq y_n$, což znamená, že $a^{y_n} \geq a^v$ a tedy $\lim a^{y_n} = a^y \geq v$.

Z nerovnosti $a^u < a^v$ plyne $a^x < a^y$.

Případ $0 < a < 1$ analogicky. \square

Později (2.2.17) bude dokázáno, že $\text{Im } f = (0, \infty)$.

1.4.20 Poznámky

1. Je-li $x = \frac{m}{p} \in \mathbb{Q}$, definice 1.4.18 souhlasí s definicí $a^{\frac{m}{p}}$. (Stačí volit $x_n = \frac{m}{p}$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.)

2. Je-li $\{x_n\}$ libovolná posloupnost reálných čísel s $\lim x_n = x$, pak $\lim a^{x_n} = a^x$.

D.: Pro každé $n \in \mathbb{N}$ zvolíme $y_n \in \mathbb{Q}$ tak, aby $x_n - \frac{1}{n} < y_n \leq x_n$ (to lze podle 1.1.17).

Podle 1.3.7 je $\lim y_n = x$. Tedy $\lim a^{y_n} = a^x$ a dále

$\lim a^{x_n} = \lim a^{y_n + x_n - y_n} = \lim a^{y_n} \lim a^{x_n - y_n} = a^x \lim a^{x_n - y_n}$

a analogicky jako v důkazu 1.4.17 ukážeme, že $\lim a^{x_n - y_n} = 1$. \square

Z exponenciálních funkcí má největší význam funkce $f(x) = e^x$, kde $e = \lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$. Někdy se označuje $e^x = \exp x$. Tuto funkci nazýváme *přirozená exponenciální funkce*.

1.4.21 Definice

Buď $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $a \neq 1$. Inverzní funkce k funkci $f(x) = a^x$ se nazývá *logaritmická funkce*. Značíme ji $\log_a x$.

1.4.22 Věta

Buď $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $a \neq 1$. Funkce $f(x) = \log_a x$ má vlastnosti:

1. $\text{Dom } f = (0, \infty)$, $\text{Im } f = (-\infty, \infty)$.
2. Pro každá dvě $x, y \in (0, \infty)$ platí: $\log_a(xy) = \log_a x + \log_a y$,
 $\log_a\left(\frac{x}{y}\right) = \log_a x - \log_a y$,
pro $x \in (0, \infty)$ a $y \in \mathbb{R}$ platí: $\log_a x^y = y \log_a x$.
3. Je rostoucí pro $a > 1$ a klesající pro $0 < a < 1$.

D: 1., 3. Plyne z 1.4.19 a obecných vlastností inverzních funkcí.

2. Označme $\log_a x = u$, $\log_a y = v$. Pak $a^u = x$, $a^v = y$ a
 $xy = a^u a^v = a^{u+v}$, tedy $\log_a(xy) = u + v = \log_a x + \log_a y$,
 $\frac{x}{y} = \frac{a^u}{a^v} = a^{u-v}$, tedy $\log_a\left(\frac{x}{y}\right) = u - v = \log_a x - \log_a y$,
 $x^y = (a^u)^y = a^{uy}$, tedy $\log_a x^y = uy = y \log_a x$. \square

1.4.23 Poznámka

Buďte $a, b \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $b > 0$, $a \neq 1 \neq b$. Pro každé $x \in (0, \infty)$ platí $\log_b x = \frac{\log_a x}{\log_a b}$.

D.: $y = \log_b x$. Pak $b^y = x$ a tedy $y \log_a b = \log_a b^y = \log_a x$. Odtud $y = \frac{\log_a x}{\log_a b}$. \square

Podobně jako u exponenciální funkce má největší význam logaritmická funkce $\log_e x$. Značí se $\ln x$ a nazývá *přirozená* nebo *přirozený logaritmus*.

Libovolný logaritmus lze převést na přirozený: $\log_a x = \frac{\ln x}{\ln a}$.

Také obecnou exponenciální funkci lze převést na přirozenou, neboť pro $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $x \in \mathbb{R}$ platí

$$e^{x \ln a} = (e^{\ln a})^x = a^x.$$

D. Mocninná funkce

1.4.24 Definice

Buď $a \in \mathbb{R}$. Funkce $f(x) = x^a$ definovaná vztahem $x^a = e^{a \ln x}$ se nazývá *obecná mocninná funkce*.

1.4.25 Věta

Buď $a \in \mathbb{R}$. Mocninná funkce $f(x) = x^a$ má vlastnosti:

1. $\text{Dom } f = (0, \infty)$, $\text{Im } f = (0, \infty)$.
2. Pro každá dvě $x, y \in (0, \infty)$ platí: $(xy)^a = x^a y^a$, $\left(\frac{x}{y}\right)^a = \frac{x^a}{y^a}$.

3. Je rostoucí pro $a > 0$ a klesající pro $a < 0$.

D: 1. Plyne z 1.4.19.1 a z 1.4.22.1.

2. $(xy)^a = e^{a \ln xy} = e^{a(\ln x + \ln y)} = e^{a \ln x} e^{a \ln y} = x^a y^a$.

Druhý vztah analogicky.

3. Buď $a > 0, 0 < x < y$. Pak podle 1.4.22.3 je $\ln x < \ln y$ a tedy $a \ln x < a \ln y$. Podle 1.4.19.3 je také $e^{a \ln x} < e^{a \ln y}$, tj. $x^a < y^a$.

Pro $a < 0$ analogicky. \square

1.4.26 Poznámka

Mocninná funkce $f(x) = x^a$ má v některých speciálních případech definiční obor širší než $(0, \infty)$. Zejména:

Je-li $a \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, pak $\text{Dom } f = (-\infty, \infty)$.

Je-li $a \in \mathbb{Z}, a < 0$, pak $\text{Dom } f = (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$.

Je-li $a = \frac{m}{n} \in \mathbb{Q}, m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}, m, n$ nesoudělná a n liché, pak pro

$a \geq 0$ je $\text{Dom } f = (-\infty, \infty)$,

$a < 0$ je $\text{Dom } f = (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$.

E. Funkce goniometrické a cyklometrické

Na jednotkovou kružnici se středem v počátku naneseme od bodu $A = (1, 0)$ oblouk délky $|x|$ v kladném smyslu pro $x \geq 0$ a v záporném smyslu pro $x < 0$. Obdržíme bod B , jehož první souřadnici označíme $\cos x$ a druhou $\sin x$. Dále klademe $\text{tg } x = \frac{\sin x}{\cos x}, \text{cotg } x = \frac{\cos x}{\sin x}$.

Tento popis není definicí, neboť se používá vágní pojem „délka oblouku“, který nebyl přesně zaveden. *Goniometrické funkce* $\sin, \cos, \text{tg}, \text{cotg}$ tedy nejsou zatím přesně definovány. Poněvadž jsou ale velice užitečné, budeme je používat již před jejich přesným definováním.

Vlastnosti goniometrických funkcí:

1. $\text{Dom } \sin = \text{Dom } \cos = \mathbb{R}$,
 $\text{Im } \sin = \text{Im } \cos = [-1, 1]$,
 $\text{Dom } \text{tg} = \mathbb{R} \setminus \{\frac{\pi}{2} + k\pi : k \in \mathbb{Z}\}, \text{Dom } \text{cotg} = \mathbb{R} \setminus \{k\pi : k \in \mathbb{Z}\}$,
 $\text{Im } \text{tg} = \text{Im } \text{cotg} = \mathbb{R}$.
2. \sin, \cos jsou periodické se základní periodou 2π ,
 tg, cotg jsou periodické se základní periodou π .
3. \sin je rostoucí na $[-\frac{\pi}{2} + 2k\pi, \frac{\pi}{2} + 2k\pi]$, klesající na $[\frac{\pi}{2} + 2k\pi, \frac{3\pi}{2} + 2k\pi], k \in \mathbb{Z}$.
 \cos je rostoucí na $[(2k-1)\pi, 2k\pi]$, klesající na $[2k\pi, (2k+1)\pi], k \in \mathbb{Z}$.
 tg je rostoucí na $(-\frac{\pi}{2} + k\pi, \frac{\pi}{2} + k\pi), k \in \mathbb{Z}$.
 cotg je klesající na $(k\pi, (k+1)\pi), k \in \mathbb{Z}$.
4. $\sin, \cos, \text{tg}, \text{cotg}$ jsou liché, \cos je sudá funkce
5. $\sin^2 x + \cos^2 x = 1, \text{tg } x \text{cotg } x = 1, \sin x = \cos(x - \frac{\pi}{2}) = \cos(\frac{\pi}{2} - x), \cos x = \sin(x + \frac{\pi}{2}) = \sin(\frac{\pi}{2} - x)$
 pro všechna přípustná x .

6. Součtové vzorce: $\sin(x+y) = \sin x \cos y + \sin y \cos x$, $\sin(x-y) = \sin x \cos y - \sin y \cos x$,
 $\cos(x+y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y$, $\cos(x-y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y$,
 $\operatorname{tg}(x+y) = \frac{\operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y}{1 - \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y}$,
 $\sin 2x = 2 \sin x \cos x$, $\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x$,
 $|\sin \frac{x}{2}| = \sqrt{\frac{1 - \cos x}{2}}$, $|\cos \frac{x}{2}| = \sqrt{\frac{1 + \cos x}{2}}$,
 $\sin x + \sin y = 2 \sin \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$, $\sin x - \sin y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \sin \frac{x-y}{2}$,
 $\cos x + \cos y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$, $\cos x - \cos y = -2 \sin \frac{x+y}{2} \sin \frac{x-y}{2}$,
 $\sin x \cos y = \frac{1}{2}(\sin(x+y) + \sin(x-y))$, $\sin x \sin y = \frac{1}{2}(\cos(x-y) - \cos(x+y))$,
 $\cos x \cos y = \frac{1}{2}(\cos(x+y) + \cos(x-y))$.

7. Jsou-li $A, B \in \mathbb{R}$, $A \neq 0$ pak $A \sin x + B \cos x = P \sin(x+q)$, kde $P = \sqrt{A^2 + B^2}$, $\operatorname{tg} q = \frac{B}{A}$.

D.:

$$\operatorname{tg} q = \frac{\sin q}{\cos q} = \frac{B}{A} = \frac{\frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}}{\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}},$$

$$-1 < \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} < 1, \quad -1 < \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} < 1,$$

$$\cos q = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad \sin q = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}},$$

$$A \sin x + B \cos x = \sqrt{A^2 + B^2} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos x \right) =$$

$$= \sqrt{A^2 + B^2} (\cos q \sin x + \sin q \cos x) = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(x+q).$$

□

Funkce cyklometrické jsou funkce inverzní k funkcím goniometrickým.

Ve všech případech je nutno zúžit definiční obor příslušné goniometrické funkce tak, aby funkce byla ryze monotonní (tedy prostá). Je přirozené tento interval vzít „co nejbližší počátku“.

| | | | | |
|-----|-----------------------|------------------|-----------------------------------|---|
| Pro | \sin | vezmeme interval | $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ | . |
| | \cos | | $[0, \pi]$ | |
| | tg | | $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ | |
| | cotg | | $(0, \pi)$ | |

Funkce cyklometrické se nazývají *arcus* a značí se \arcsin , \arccos , arctg , $\operatorname{arccotg}$.

Vlastnosti cyklometrických funkcí

1. $\operatorname{Dom} \arcsin = \operatorname{Dom} \arccos = [-1, 1]$, $\operatorname{Im} \arcsin = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, $\operatorname{Im} \arccos = [0, \pi]$
 $\operatorname{Dom} \operatorname{arctg} = \operatorname{Dom} \operatorname{arccotg} = \mathbb{R}$, $\operatorname{Im} \operatorname{arctg} = (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, $\operatorname{Im} \operatorname{arccotg} = (0, \pi)$.

2. Pro každé $x \in [-1, 1]$ platí $\arcsin x + \arccos x = \frac{\pi}{2}$.

D.: $y = \arcsin x$, $x = \sin y = \cos(\frac{\pi}{2} - y) \Rightarrow \arccos x = \frac{\pi}{2} - y$; $y \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \Rightarrow \frac{\pi}{2} - y \in [0, \pi]$. □

3. Pro každé $x \in \mathbb{R}$ platí $\operatorname{arctg} x + \operatorname{arccotg} x = \frac{\pi}{2}$.

D.: $x \in \mathbb{R}$, $y = \operatorname{arctg} x \Rightarrow x = \operatorname{tg} y = \frac{\sin y}{\cos y} = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} - y)}{\sin(\frac{\pi}{2} - y)} = \operatorname{cotg}(\frac{\pi}{2} - y) \Rightarrow \operatorname{arccotg} x = \frac{\pi}{2} - y$. □

F. Dodatek

- **Polární souřadnice** r, φ .

Transformace kartézských souřadnic na polární:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\varphi \text{ je řešením soustavy rovnic } \cos \varphi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \sin \varphi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$\text{tj. } \varphi = \begin{cases} \arctg \frac{y}{x} + 2k\pi, & x > 0 \\ \frac{\pi}{2} + k\pi, & x = 0 \\ \arctg \frac{y}{x} + (2k+1)\pi, & x < 0 \end{cases}$$

Transformace polárních souřadnic na kartézské: $x = r \cos \varphi$

$$y = r \sin \varphi$$

- **Parametrické vyjádření**

Buďte φ, ψ funkce, $J \subseteq \text{Dom } \varphi \cap \text{Dom } \psi$ interval.

$$\begin{aligned} x &= \varphi(t), \\ y &= \psi(t), \quad t \in J \end{aligned}$$

je tzv. parametrické vyjádření nějaké podmnožiny \mathbb{R}^2 .

1.5 Cvičení

Určete definiční obor funkcí

1) $f(x) = \sqrt{\frac{x^2 - 5x + 6}{x^2 - 5x + 4}}$, 2) $f(x) = \log \sin 2x$.

Rozhodněte, zda funkce je sudá nebo lichá

3) $f(x) = -\sqrt[3]{x}$, 4) $f(x) = \sqrt{x}$.

Najděte nejmenší periodu funkcí

5) $f(x) = \sin \frac{1}{3}x$, 6) $f(x) = \text{tg } ax$.

Najděte intervaly, na nichž jsou ryze monotonní funkce

7) $f(x) = x + |x|$, 8) $f(x) = 2^{1/x}$.

Najděte inverzní funkci k funkci

9) $f(x) = 2^{3x-1}$, 10) $f(x) = x + [x]$.

Rozhodněte, zda je posloupnost $\{a_n\}$ ohraničená

11) $a_n = 1 - \cos^n \frac{\pi}{n}$, 12) $a_n = \frac{n^n}{n!}$.

Rozhodněte, zda je posloupnost $\{a_n\}$ monotonní

13) $a_n = \frac{n^2 + 1}{n + 1}$, 14) $a_n = \log n - n$.

Vypočítejte limitu posloupnosti $\{a_n\}$

15) $a_n = \frac{2n^2 - n + 3}{3n^2 + n - 5}$

16) $a_n = \frac{3^{n+1} + (-5)^{n-1}}{3^n + (-5)^n}$,

17) $a_n = \sqrt{n^2 + 3n + 2} - \sqrt{n^2 - n + 1}$, 18) $a_n = \frac{1^2}{n^3} + \frac{3^2}{n^3} + \dots + \frac{(2n-1)^2}{n^3}$,

19) $a_n = \frac{1}{n^2} + \frac{1}{(n+1)^2} + \dots + \frac{1}{(2n)^2}$, 20) $a_n = \frac{1}{\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{2n}}$.

21) Zjistěte, zda posloupnost $\{\frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \dots + \frac{1}{n!}\}$ je konvergentní.

22) Najděte limes superior a inferior posloupnosti $\left\{ (-1)^n \left(\sqrt[3]{2} + \left(1 + \frac{1}{2n} \right)^{2n} \right) + \sqrt[3]{2} \right\}$.

Polynomy rozložte v reálném oboru

23) $x^4 - x^3 + 2x^2 - x + 1$, 24) $x^6 + 1$.

Racionální funkce rozložte na parciální zlomky

25) $\frac{x^4 + 6x^2 + x - 2}{x^4 - 2x^3}$, 26) $\frac{x - 1}{x^4 + 3x^2 + 2}$.

27) jaký je vztah mezi grafy funkcí $f(x) = a^x$ a $g(x) = \left(\frac{1}{a}\right)^x$, $a > 0$?

Určete definiční obor funkce f , zjednodušte její vyjádření a znázorněte ji graficky

28) $f(x) = \log_x a$, 29) $f(x) = \arcsin(\sin x)$.

Vypočítejte

30) $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^2 - 1}{x^3 - 1}$,

31) $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^m - 1}{x^n - 1}$,

32) $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{\sqrt[3]{x} - 1}{\sqrt{x} - 1}$,

33) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{1+x} - \sqrt[3]{1-x}}{\sqrt{1+x} - \sqrt{1-x}}$,

34) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin ax}{\sin bx}$,

35) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos^3 x}{x \sin 2x}$,

36) $\lim_{x \rightarrow \infty} (\sqrt{x^2 + x + 1} - \sqrt{x^2 - 4x + 1})$,

37) $\lim_{x \rightarrow -\infty} (\sqrt{x^2 + 5x} + x)$,

38) $\lim_{x \rightarrow 1+} \left(\frac{x+1}{x+3}\right)^{\cotg \pi x}$,

39) $\lim_{x \rightarrow \pi+} (\sin^2 x)^{\tg x/2}$.

40) Vysvětlete význam podmínky $(\exists \varepsilon > 0)(\forall \delta > 0)(\forall x)(0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$.

Najděte body nespojitosti následujících funkcí a určete jejich typ

41) $f(x) = \frac{x^3 - 1}{x^2 - 1}$, 42) $f(x) = \sin \frac{\pi}{x}$.

Výsledek: 1) $(-\infty, 1) \cup [2, 3] \cup (4, \infty)$ 2) $\{x \in \mathbb{R} : k\pi < x < (2k+1)\frac{\pi}{2}, k \in \mathbb{Z}\}$ 3) sudá 4) ani sudá, ani lichá 5) 6π 6) $\frac{\pi}{a}$ 7) na $[0, \infty)$ rostoucí 8) na $(-\infty, 0)$ a na $(0, \infty)$ klesající 9) $f^{-1}(y) = \frac{1}{3}(1 + \log_2 y)$ 10) $f^{-1}(y) = y - k$ pro $y \in [2k, 2k+1)$, $k \in \mathbb{Z}$ 11) ano, $0 \leq a_n \leq 2$ 12) ohraničená zdola $a_n > 0$ 13) rostoucí 14) klesající 15) $\frac{2}{3}$ 16) $-\frac{1}{5}$ 17) 2 18) $\frac{4}{3}$ 19) 0 20) ∞ 21) ano; je rostoucí a shora ohraničená 22) $2 + e$, $-e$ 23) $(x^2 + 1) \left((x - \frac{1}{2})^2 + \frac{3}{4} \right)$ 24) $(x^2 - \sqrt{3}x + 1)(x^2 + \sqrt{3}x + 1)(x^2 + 1)$ 25) $1 + \frac{1}{x^3} - \frac{3}{x} + \frac{5}{x-2}$ 26) $\frac{x-1}{x^2+1} - \frac{x-1}{x^2+2}$ 27)

souměrné kolem osy y 28) $\text{Dom } f = (0, 1) \cup (1, \infty)$, $f(x) - \frac{\ln a}{\ln x}$ 29) $\text{Dom } f = \mathbb{R}$, f je 2π periodické rozšíření funkce $g(x) = \begin{cases} x, & x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) \\ \pi - x, & x \in [\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}) \end{cases}$ 30) $\frac{2}{3}$ 31) $\frac{m}{n}$ 32) $\frac{2}{3}$ 33) $\frac{2}{3}$ 34) $\frac{a}{b}$ 35) $\frac{3}{4}$ 36) $\frac{5}{2}$ 37) $-\infty$ 38) 0 39) ∞ 40) f je ohraničená v $\mathbb{R} \setminus \{x_0\}$ 41) $x = 1$ odstranitelná, $x = -1$ typu A3 42) $x = 0$ druhého druhu

1.6 Kontrolní otázky

1) **Uvedte Definicí x.y.z;**

- definici (definovaný pojem) vysvětlete
- ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
- presentujte přehled základních vlastností
- charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití

2) **Formulujte Větu x.y.z;**

- vysvětlete předpoklady
- vysvětlete tvrzení
- větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
- uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
- presentujte teoretický a případně praktický význam

3) **Vyřešte příklad x.y.z;**

- popište jednotlivé kroky postupu
- citujte použitá tvrzení
- postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 2

Diferenciální počet

2.1 Limita funkce

2.1.1 Definice

Řekneme, že funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}^*$ limitu $a \in \mathbb{R}^*$ a píšeme $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, jestliže ke každému okolí $\mathcal{O}(a)$ čísla a existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ čísla x_0 takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $f(x) \in \mathcal{O}(a)$.

Definice dostane konkrétní tvar podle toho, zda $x_0 \in \mathbb{R}$ nebo $x_0 = \pm\infty$ a $a \in \mathbb{R}$ nebo $a = \pm\infty$:

1. Vlastní limita ve vlastním bodě

$$\bullet x_0 \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R} : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$$

2. Nevlastní limita ve vlastním bodě

$$\bullet x_0 \in \mathbb{R}, a = \infty : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow f(x) > h)$$

$$\bullet x_0 \in \mathbb{R}, a = -\infty : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < |x - x_0| < \delta \Rightarrow f(x) < h)$$

3. Vlastní limita v nevlastním bodě

$$\bullet x_0 = \infty, a \in \mathbb{R} : \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = a \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists h \in \mathbb{R})(\forall x)(x > h \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$$

$$\bullet x_0 = -\infty, a \in \mathbb{R} : \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = a \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists h \in \mathbb{R})(\forall x)(x < h \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$$

4. Nevlastní limita v nevlastním bodě

$$\bullet x_0 = \infty, a = \infty : \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists k \in \mathbb{R})(\forall x)(x > k \Rightarrow f(x) > h)$$

$$\bullet x_0 = -\infty, a = \infty : \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists k \in \mathbb{R})(\forall x)(x < k \Rightarrow f(x) > h)$$

$$\bullet x_0 = \infty, a = -\infty : \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = -\infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists k \in \mathbb{R})(\forall x)(x > k \Rightarrow f(x) < h)$$

$$\bullet x_0 = -\infty, a = -\infty : \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = -\infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists k \in \mathbb{R})(\forall x)(x < k \Rightarrow f(x) < h)$$

2.1.2 Poznámky

1. V definici 2.1.1 se nevyskytuje žádný požadavek na $f(x_0)$. Existence a hodnota $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ nezávisí na tom, zda $x_0 \in \text{Dom } f$, a pokud ano, tak nezávisí na hodnotě $f(x_0)$.

Existuje-li však $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$, musí být funkce f definována v nějakém ryzím okolí bodu x_0 .

2. Buďte f, g funkce, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a necht' existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$. Jestliže existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $f(x) = g(x)$, pak existuje také $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x)$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = a$.

3. Logickou negací definice 2.1.1 obdržíme výrok „neplatí $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$ “: Existuje okolí $\mathcal{O}(a)$ bodu a takové, že v každém okolí $\mathcal{O}(x_0)$ bodu x_0 existuje číslo x takové, že $f(x) \notin \mathcal{O}(a)$. Jestliže neplatí $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, pak buď $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = b \neq a$ nebo $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ neexistuje.
4. Existence a hodnota limity funkce f v bodě x_0 je lokální vlastností této funkce.

2.1.3 Příklady

1. $\lim_{x \rightarrow 0} x^2 = 0$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Položme $\delta = \sqrt{\varepsilon}$. Je-li $0 < |x - 0| = |x| < \delta = \sqrt{\varepsilon}$, pak $|x^2 - 0| = |x^2| = |x|^2 < \varepsilon$.
□

2. $\lim_{x \rightarrow 0} g(x) = 0$ pro $g = \begin{cases} x^2, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$.

D.: Stejně jako v 1. □

3. $\lim_{x \rightarrow 0} \chi(x)$ neexistuje.

D.: Pripusťme, že $\lim_{x \rightarrow 0} \chi(x) = a \in \mathbb{R}$.

Nechť $a \neq 0$. Položme $\varepsilon = \frac{|a|}{2} > 0$. Buď $\delta > 0$ libovolné a $x \in (-\delta, \delta) \cap \mathbb{I}$. Pak

$$\chi(x) = 0 \notin \left(a - \frac{|a|}{2}, a + \frac{|a|}{2} \right).$$

Je tedy $a = 0$. Položme $\varepsilon = \frac{1}{2} > 0$. Buď $\delta > 0$ libovolné a $x \in (-\delta, \delta) \cap \mathbb{Q}$. Pak $\chi(x) = 1 \notin (-\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$.

Nemůže tedy být $\lim_{x \rightarrow 0} \chi(x) = a \in \mathbb{R}$.

Pripusťme, že $\lim_{x \rightarrow 0} \chi(x) = \infty$. Avšak pro libovolné $x \in \mathbb{R}$ je $\chi(x) \in \{0, 1\}$, tedy pro $h > 1$ nemůže být $\chi(x) > h$ pro žádné $x \in \mathbb{R}$.

Z podobných důvodů nemůže být $\lim_{x \rightarrow 0} \chi(x) = -\infty$. □

2.1.4 Věta (Heineova podmínka [1821 – 1881])

Funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}^*$ limitu $a \in \mathbb{R}^*$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq \text{Dom } f$ takovou, že $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ a $x_n \neq x_0$ pro $n \in \mathbb{N}$ platí $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$.

D.:

„ \Rightarrow “ Nechť $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$ a nechť $\{x_n\}$ je posloupnost splňující předpoklady.

Buď $\mathcal{O}(a)$ libovolné. Pak existuje ryzí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ takové, že pro $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $f(x) \in \mathcal{O}(a)$. Poněvadž $x_n \rightarrow x_0$, $x_n \neq x_0$, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ jest $x_n \in \mathcal{O}(x_0)$ a tedy $f(x_n) \in \mathcal{O}(a)$, což znamená, že $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$.

„ \Leftarrow “ Nechť platí tvrzení věty.

Zvolme libovolnou $\{x_n\}$, $x_n \rightarrow x_0$, $x_n \neq x_0$. Pak existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a \in \mathbb{R}^*$. Ukážeme, že

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a.$$

Pripusťme, že existuje $\mathcal{O}(a)$ takové, že v každém ryzím okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 existuje x takové, že $f(x) \notin \mathcal{O}(a)$.

$$x_0 \in \mathbb{R} \quad \mathcal{O}_n(x_0) = (x_0 - \frac{1}{n}, x_0) \cup (x_0, x_0 + \frac{1}{n})$$

$$\text{Je-li } x_0 = \infty \quad \text{položíme } \mathcal{O}_n(x_0) = (n, \infty)$$

$$x_0 = -\infty \quad \mathcal{O}_n(x_0) = (-\infty, -n)$$

Pro libovolné $n \in \mathbb{N}$ existuje $y_n \in \mathcal{O}_n(x_0)$ takové, že $f(y_n) \notin \mathcal{O}(a)$. Z konstrukce $\mathcal{O}_n(x_0)$ plyne, že $y_n \rightarrow x_0$, $y_n \neq x_0$ a tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} f(y_n) = a$. To ovšem není možné, neboť $f(y_n) \notin \mathcal{O}(a)$.

□

2.1.5 Poznámka

Nechť $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$ a necht' pro každé $n \in \mathbb{N}$ je $a_n = f(n)$. Pak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$.

D.: Buď $\mathcal{O}(a)$ libovolné. Pak existuje $k \in \mathbb{R}$ takové, že pro $x > k$ je $f(x) \in \mathcal{O}(a)$.
Volme $n_0 = [k] + 1$. Pak pro $n \geq n_0$ je $a_n = f(n) \in \mathcal{O}(a)$ a tedy $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = a$. \square

Heineova podmínka umožňuje převádět vlastnosti limity a nevlastní limity posloupnosti na vlastnosti limity funkce:

2.1.6 Věta (Cauchyovo – Bolzanovo kritérium pro existenci vlastní limity)

Funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}^*$ limitu $a \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když ke každému $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že pro každé dva body $x_1, x_2 \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ platí $|f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$.

D.: 1.3.22 a 2.1.4 \square

2.1.7 Věta (vlastnosti limity)

1. Každá funkce má v libovolném bodě $x_0 \in \mathbb{R}^*$ nejvýše jednu limitu.
(viz 1.3.3)
2. Má-li funkce f v bodě $x_0 \in \mathbb{R}^*$ vlastní limitu, pak existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je funkce f ohraničená.
(viz 1.3.4)
Jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a > 0$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a < 0$), pak existuje ryzí okolí $\mathcal{O}'(x_0)$ bodu x_0 takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}'(x_0)$ je $f(x) > 0$ (resp. $f(x) < 0$).

D.: Necht' $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a > 0$ a buď $\varepsilon = \frac{a}{2} > 0$. Existuje $\delta > 0$ takové, že pro každé $x \in (x_0 - \delta, x_0) \cup (x_0, x_0 + \delta)$ je $f(x) \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$, zejména tedy $f(x) > a - \varepsilon = \frac{a}{2} > 0$. Platnost druhého tvrzení ukážeme analogicky. \square

3. Necht' $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a necht' existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je funkce g ohraničená. Pak je $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = 0$.
(viz 1.3.5.3)

4. Necht' $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b \in \mathbb{R}$. Pak

- existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)|$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |a|$,
- existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x))$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = a + b$,
- existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - g(x))$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - g(x)) = a - b$,
- existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x)$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = ab$,
- pokud $b \neq 0$ existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{a}{b}$.

(viz 1.3.6)

5. Necht' f, g, h jsou funkce, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ platí $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$. Jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = a \in \mathbb{R}^*$, pak $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = a$.
(viz 1.3.7)

6. Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$ a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je $f(x) \neq 0$ (resp. $f(x) > 0$, resp. $f(x) < 0$). Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{|f(x)|} = \infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = \infty$, resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = -\infty$).
(viz 1.3.12.1)

7. Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = \infty$. Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = 0$.
(viz 1.3.12.4)

8. Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$) a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je funkce g zdola (resp. shora) ohraničená. Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = \infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = -\infty$).
(viz 1.3.12.2)

9. Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$ a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je $g(x) \geq \delta > 0$ (resp. $g(x) \leq \delta < 0$). Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = \infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = -\infty$).
Necht $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$ a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je $g(x) \geq \delta > 0$ (resp. $g(x) \leq \delta < 0$). Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = -\infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = \infty$).
(viz 1.3.12.3)

10. Funkce *signum* (znaménko) je pro každé $x \in \mathbb{R}$ definována předpisem $\text{sgn } x = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$

Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \neq 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$ a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je $g(x) \neq 0$ a $\text{sgn } f(x) = \text{sgn } g(x)$ (resp. $\text{sgn } f(x) = -\text{sgn } g(x)$). Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \infty$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = -\infty$).
(viz 1.3.12.1 a předchozí tvrzení)

11. Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b$ a necht existuje ryzí okolí bodu x_0 , v němž je $f(x) < g(x)$. Pak $a \leq b$.
(viz 1.3.5.1)

2.1.8 Věta (o limitě složené funkce)

Necht $x_0 \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = \alpha \in \mathbb{R}^*$ a $\lim_{y \rightarrow \alpha} f(y) = a \in \mathbb{R}^*$. Necht existuje ryzí okolí $\mathcal{O}_1(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 , v němž platí $\varphi(x) \neq \alpha$. Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} f(\varphi(x)) = a$. (Tj. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(\varphi(x)) = \lim_{y \rightarrow \alpha} \lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) f(y) = a$.)

D.: Buď $\mathcal{O}(a)$ libovolné okolí bodu a . K němu existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(\alpha) \setminus \{\alpha\}$ takové, že pro $y \in \mathcal{O}(\alpha) \setminus \{\alpha\}$ je $f(y) \in \mathcal{O}(a)$.

K $\mathcal{O}(\alpha)$ existuje ryzí okolí $\mathcal{O}_2(x_0) \setminus \{x_0\}$ takové, že pro $x \in \mathcal{O}_2(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $\varphi(x) \in \mathcal{O}(\alpha)$.

Položme $\mathcal{O}(x_0) = (\mathcal{O}_1(x_0) \setminus \{x_0\}) \cap (\mathcal{O}_2(x_0) \setminus \{x_0\})$. Pak pro $x \in \mathcal{O}(x_0)$ je $\varphi(x) \in \mathcal{O}(\alpha)$ a $\varphi(x) \neq \alpha$, tj. $\varphi(x) \in \mathcal{O}(\alpha) \setminus \{\alpha\}$. Tedy $f(\varphi(x)) \in \mathcal{O}(a)$, neboli $\lim_{x \rightarrow x_0} f(\varphi(x)) = a$. \square

2.1.9 Příklady

1. Necht $f(x) = c \in \mathbb{R}$ pro každé $x \in \mathbb{R}$. Pak pro každé $x_0 \in \mathbb{R}^*$ jest $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = c$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné, $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ libovolné ryzí okolí x_0 . Pro $x \in \mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $|f(x) - c| = |c - c| = 0 < \varepsilon$. \square

2. Necht $f(x) = x$ pro každé $x \in \mathbb{R}$. Pak pro každé $x_0 \in \mathbb{R}$ jest $\lim_{x \rightarrow x_0} x = x_0$ a dále $\lim_{x \rightarrow \infty} x = \infty$,
 $\lim_{x \rightarrow -\infty} x = -\infty$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné a $\delta = \varepsilon$. Pak pro $x \in (x_0 - \delta, x_0) \cup (x_0, x_0 + \delta)$ je $|f(x) - x_0| = |x - x_0| < \delta = \varepsilon$.
 Buď $h \in \mathbb{R}$ libovolné a $k = h$. Pak pro $x > k$ je $f(x) = x > k = h$ a pro $x < k$ je $f(x) = x < k = h$.
 \square

3. Buď $P(x)$ polynom. Pak pro libovolné $x_0 \in \mathbb{R}$ jest $\lim_{x \rightarrow x_0} P(x) = P(x_0)$.

D.: S využitím předchozího výsledku a 2.1.7.4 jest

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} x^n &= \lim_{x \rightarrow x_0} x x^{n-1} = \lim_{x \rightarrow x_0} x \lim_{x \rightarrow x_0} x^{n-1} = x_0 \lim_{x \rightarrow x_0} x^{n-1} = x_0 \lim_{x \rightarrow x_0} x \lim_{x \rightarrow x_0} x^{n-2} = \\ &= x_0 x_0 \lim_{x \rightarrow x_0} x^{n-2} = \dots = x_0^{n-1} \lim_{x \rightarrow x_0} x = x_0^n. \end{aligned}$$

Tvrzení nyní plyne z 2.1.7.4. \square

4. Buď $R(x)$ racionální lomená funkce a $x_0 \in \text{Dom } R$. Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} R(x) = R(x_0)$.

D.: plyne z 3. a 2.1.7.4. \square

5. $f(x) = \frac{x^4 - 1}{x^3 - 1}$.

Pro $x \neq 1$ platí $\frac{x^4 - 1}{x^3 - 1} = \frac{(x-1)(x^3 + x^2 + x + 1)}{(x-1)(x^2 + x + 1)} = \frac{x^3 + x^2 + x + 1}{x^2 + x + 1}$ a tedy podle 2.1.2.4 a předchozího výsledku je $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^4 - 1}{x^3 - 1} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 + x^2 + x + 1}{x^2 + x + 1} = \frac{4}{3}$.

6. Buď $a > 0$, $f(x) = a^x$. Pak pro libovolné $x_0 \in \mathbb{R}$ je $\lim_{x \rightarrow x_0} a^x = a^{x_0}$.

D.: plyne z 1.4.20.2 a 2.1.4. \square

7. Buď $a > 0$, $f(x) = x^a$, $x_0 \in \text{Dom } f$. Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} x^a = x_0^a$.

D.: plyne z 1.4.24, předchozího tvrzení a 2.1.8. \square

8. Pro libovolné $x_0 \in \mathbb{R}$ je $\lim_{x \rightarrow x_0} \sin x = \sin x_0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \cos x = \cos x_0$.

Plyne z geometrického názoru. (Funkce \sin a \cos nebyly přesně definovány.)

9. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$.

D.: Pro $x \in (0, \frac{\pi}{2})$ platí: $0 < \sin x$. Plocha kruhové výseče OAC je $P_0 = \frac{1}{2}x$, plocha trojúhelníka OAC je $P_1 = \frac{1}{2} \sin x$ a plocha trojúhelníka OAB je $P_2 = \frac{1}{2} \text{tg } x$. Jest $P_1 < P_0 < P_2$, neboli

$$\begin{aligned} \sin x &< x < \text{tg } x \\ 1 &< \frac{x}{\sin x} < \frac{1}{\cos x} \\ \cos x &< \frac{\sin x}{x} < 1 \end{aligned}$$

Všechny funkce v poslední nerovnosti jsou sudé, to znamená, že tato nerovnost platí i pro $x \in (-\frac{\pi}{2}, 0)$.
 Dále podle předchozího $\lim_{x \rightarrow 0} \cos x = \cos 0 = 1$. Tvrzení nyní plyne z 2.1.7.5. \square

10. $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} \frac{1 + \cos x}{1 + \cos x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos^2 x}{x^2(1 + \cos x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin^2 x}{x^2} \frac{1}{1 + \cos x} = 1 \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$

2.1.10 Poznámka

Předpoklad o existenci ryzího okolí $\mathcal{O}_1(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 nelze v 2.1.8 obecně vynechat.

Např. pro $\varphi(x) = 0$, $f(y) = \begin{cases} 0, & y \neq 0 \\ 1, & y = 0 \end{cases}$ platí

$f(\varphi(x)) = 1$ a tedy podle 2.1.9.1 pro libovolné $x_0 \in \mathbb{R}^*$ je $\lim_{x \rightarrow x_0} f(\varphi(x)) = 1$,

avšak $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = 0$, $\lim_{y \rightarrow 0} f(y) = 0$.

2.1.11 Definice

Řekneme, že funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ *limitu zprava* (resp. *zleva*) rovnou $a \in \mathbb{R}^*$ a píšeme $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = a$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = a$), jestliže ke každému okolí $\mathcal{O}(a)$ bodu a existuje pravé (resp. levé) ryzí okolí $(x_0, x_0 + \delta)$ (resp. $(x_0 - \delta, x_0)$) takové, že pro každé $x \in (x_0, x_0 + \delta)$ (resp. $x \in (x_0 - \delta, x_0)$) platí $f(x) \in \mathcal{O}(a)$.

Limita zprava a limita zleva se souhrnně nazývají *jednostranné limity*.

- $a \in \mathbb{R}$: $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = a \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x - x_0 < \delta \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$
 $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = a \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x_0 - x < \delta \Rightarrow |f(x) - a| < \varepsilon)$
- $a = \infty$: $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = \infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x - x_0 < \delta \Rightarrow f(x) > h)$
 $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = \infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x_0 - x < \delta \Rightarrow f(x) > h)$
- $a = -\infty$: $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = -\infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x - x_0 < \delta \Rightarrow f(x) < h)$
 $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = -\infty \Leftrightarrow (\forall h \in \mathbb{R})(\exists \delta > 0)(\forall x)(0 < x_0 - x < \delta \Rightarrow f(x) < h)$

2.1.12 Věta

Funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ limitu $a \in \mathbb{R}^*$ právě tehdy, když má v tomto bodě limitu zprava i zleva a platí $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = a$.

D.: plyne přímo z definic limity a jednostranných limit a z faktu $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\} = (x_0 - \delta, x_0) \cup (x_0, x_0 + \delta)$. \square

2.1.13 Poznámka

I pro jednostranné limity platí analogie Heineovy podmínky **2.1.4**:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = a &\Leftrightarrow \text{pro každou } \{x_n\} \text{ takovou, že } \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0, x_n > x_0 \text{ platí } \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a, \\ \lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = a &\Leftrightarrow \text{pro každou } \{x_n\} \text{ takovou, že } \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0, x_n < x_0 \text{ platí } \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a. \end{aligned}$$

V důsledku toho i pro jednostranné limity platí **2.1.6**, **2.1.7** a **2.1.8**.

2.1.14 Příklad

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1.$$

Ř.:

- Podle **1.3.10** posloupnost $\left\{ \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \right\}$ je rostoucí a její limita je e , takže podle **1.3.9** pro každé $n \in \mathbb{N}$

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < e.$$

- Vyšetříme $\lim_{x \rightarrow 0+} \frac{e^x - 1}{x}$:

$$\text{Buďte } x \in (0, \frac{1}{2}), n = \left\lceil \frac{1}{x} \right\rceil, \text{ tedy } \frac{1}{n+1} < x \leq \frac{1}{n}.$$

Podle **1.3.10** a prvního kroku řešení je

$$\left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1} < e < \left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^n$$

a tedy podle **1.4.19.3** je $e^x \leq e^{\frac{1}{n}} < 1 + \frac{1}{n-1}$, $e^x > e^{\frac{1}{n+1}} > 1 + \frac{1}{n+1}$.

Poněvadž $n \leq \frac{1}{x}$, jest $n+1 \leq \frac{1}{x} + 1 = \frac{1+x}{x}$, tedy $\frac{x}{1+x} \leq \frac{1}{n+1}$.

Poněvadž $n + 1 > \frac{1}{x}$, jest $n - 1 > \frac{1}{x} - 2 = \frac{1 - 2x}{x}$, tedy $\frac{x}{1 - 2x} > \frac{1}{n - 1}$.

Celkem

$$\begin{aligned} 1 + \frac{x}{1+x} &< e^x < 1 + \frac{x}{1-2x} \\ \frac{x}{1+x} &< e^x - 1 < \frac{x}{1-2x} \\ \frac{1}{1+x} &< \frac{e^x - 1}{x} < \frac{1}{1-2x} \end{aligned}$$

a podle 2.1.7.5 je $\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{e^x - 1}{x} = 1$.

- Vyšetříme $\lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{e^x - 1}{x}$:

Buď $x \in (-\frac{1}{2}, 0)$ Položíme $y = -x$. Pak $y \in (0, \frac{1}{2})$ a s využitím předchozího kroku dostaneme

$$\begin{aligned} 1 + \frac{y}{1+y} &< e^y < 1 + \frac{y}{1-2y} \\ \frac{1+2y}{1+y} &< e^y < \frac{1-y}{1-2y} \\ \frac{1-2y}{1-y} &< e^{-y} < \frac{1+y}{1+2y} \\ \frac{1+2x}{1+x} &< e^x < \frac{1-x}{1-2x} \\ \frac{x}{1+x} &< e^x - 1 < \frac{x}{1-2x} \\ \frac{1}{1+x} &> \frac{e^x - 1}{x} > \frac{1}{1-2x} \end{aligned}$$

a podle 2.1.7.5 je $\lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{e^x - 1}{x} = 1$.

Nyní $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1$ podle 2.1.12. \square

2.1.15 Věta

Nechť funkce f je monotonní v nějakém levém (resp. pravém) ryzím okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$. Pak existuje $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x)$).

Podrobněji:

1. Nechť funkce f je neklesající v nějakém levém ryzím okolí $\mathcal{L}(x_0)$ bodu $x_0 \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}$. Je-li f shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0)\}$, není-li f shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \infty$.
2. Nechť funkce f je nerostoucí v nějakém levém ryzím okolí $\mathcal{L}(x_0)$ bodu $x_0 \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}$. Je-li f zdola ohraničená v $\mathcal{L}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \inf\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0)\}$, není-li f zdola ohraničená v $\mathcal{L}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = -\infty$.
3. Nechť funkce f je neklesající v nějakém pravém ryzím okolí $\mathcal{P}(x_0)$ bodu $x_0 \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$. Je-li f zdola ohraničená v $\mathcal{P}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \inf\{f(x) : x \in \mathcal{P}(x_0)\}$, není-li f zdola ohraničená v $\mathcal{P}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = -\infty$.

4. Necht funkce f je nerostoucí v nějakém pravém ryzím okolí $\mathcal{P}(x_0)$ bodu $x_0 \in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$. Je-li f shora ohraničená v $\mathcal{P}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{P}(x_0)\}$, není-li f shora ohraničená v $\mathcal{P}(x_0)$, je $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = \infty$.

D.: Provedeme pouze pro tvrzení 1. Důkazy ostatních lze provést analogicky.

- Necht $x_0 \in \mathbb{R}$ a f je shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0) = (x_0 - \alpha, x_0)$. Množina $\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0)\}$ je neprázdná a shora ohraničená, tedy podle 1.1.7 (R14) existuje $\sup\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0)\} = a \in \mathbb{R}$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 1.1.6 (s2*) existuje $x_1 \in \mathcal{L}(x_0)$ takové, že $f(x_1) > a - \varepsilon$. Položíme $\delta = x_0 - x_1$. Pak je $(x_1, x_0) = (x_0 - \delta, x_0) \subseteq \mathcal{L}(x_0)$. Poněvadž f je na $\mathcal{L}(x_0)$ neklesající, pro každé $x \in (x_0 - \delta, x_0)$ platí $f(x) \geq f(x_1) > a - \varepsilon$. Poněvadž $a = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0)\}$, pro $x \in (x_0 - \delta, x_0)$ platí $f(x) \leq a$. Celkem pro $x \in (x_0 - \delta, x_0)$ je $a - \varepsilon < f(x) \leq a$, což znamená $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = a$.
- Necht $x_0 = \infty$ a f je shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0) = (\alpha, \infty)$. Zopakujeme úvahy z předchozího kroku s tím rozdílem, že nedefinujeme δ . Dojdeme k tomu, že pro $x \in (x_1, \infty)$ je $a - \varepsilon < f(x) \leq a$.
- Necht $x_0 \in \mathbb{R}$ a f není shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0) = (x_0 - \alpha, x_0)$. Buď $h \in \mathbb{R}$ libovolné. Poněvadž f není shora ohraničená, v $(x_0 - \alpha, x_0)$, existuje $x_1 \in (x_0 - \alpha, x_0)$ takové, že $f(x_1) > h$. Položíme $\delta = x_0 - x_1$. Poněvadž f je neklesající na $(x_0 - \alpha, x_0)$, pro každé $x \in (x_0 - \delta, x_0)$ platí $f(x) \geq f(x_1) > h$, což znamená $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = \infty$.
- Necht $x_0 = \infty$ a f není shora ohraničená v $\mathcal{L}(x_0) = (\alpha, \infty)$. Zopakujeme úvahy z předchozího kroku s tím rozdílem, že nedefinujeme δ . Pak pro $x \in (x_1, \infty)$ je $f(x) > h$.

□

Poznámka: (Oboustranná) limita nemusí existovat.

2.1.16 Definice

Řekneme, že $a \in \mathbb{R}$ je *limitní bod* funkce f pro $x_0 \in \mathbb{R}^*$, jestliže existuje posloupnost $\{x_n\}$ taková, že $x_n \neq x_0$ pro každé $n \in \mathbb{N}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ a $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = a$.

Označme $\Omega(f, x_0)$ množinu limitních bodů funkce f pro $x_0 \in \mathbb{R}^*$.

Je-li funkce f ohraničená shora v nějakém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\Omega(f, x_0) \neq \emptyset$, klademe

$$\limsup_{x \rightarrow x_0} f(x) = \sup \Omega(f, x_0).$$

Je-li funkce f ohraničená shora v nějakém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\Omega(f, x_0) = \emptyset$, klademe $\limsup_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$.

Není-li funkce f ohraničená shora v každém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$, klademe $\limsup_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$.

Je-li funkce f ohraničená zdola v nějakém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\Omega(f, x_0) \neq \emptyset$, klademe $\liminf_{x \rightarrow x_0} f(x) = \inf \Omega(f, x_0)$.

Je-li funkce f ohraničená zdola v nějakém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a $\Omega(f, x_0) = \emptyset$, klademe $\liminf_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$.

Není-li funkce f ohraničená zdola v každém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}^*$, klademe $\liminf_{x \rightarrow x_0} f(x) = -\infty$.

$$\begin{aligned} \text{Snadno ověříme, že } \limsup_{x \rightarrow x_0} f(x) &= \lim_{x \rightarrow x_0} (\sup\{f(\xi) : 0 < |x_0 - \xi| < |x_0 - x|\}) \\ \liminf_{x \rightarrow x_0} f(x) &= \lim_{x \rightarrow x_0} (\inf\{f(\xi) : 0 < |x_0 - \xi| < |x_0 - x|\}). \end{aligned}$$

Jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$, pak a je limitním bodem funkce f pro $x_0 \in \mathbb{R}^*$.

Zřejmým způsobem lze zavést pravé a levé limitní body a $\limsup_{x \rightarrow x_0+} f(x)$, $\limsup_{x \rightarrow x_0-} f(x)$, $\liminf_{x \rightarrow x_0+} f(x)$, $\liminf_{x \rightarrow x_0-} f(x)$.

Přímo z definice plyne

2.1.17 Věta

$\liminf_{x \rightarrow x_0} f(x) \leq \limsup_{x \rightarrow x_0} f(x)$. Rovnost nastane právě tehdy, když existuje vlastní nebo nevlastní $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$.

2.2 Spojité funkce

2.2.1 Definice

Řekneme, že funkce f je *spojitá v bodě* $x_0 \in \mathbb{R}$, jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$. Řekneme, že funkce f je *spojitá v bodě* $x_0 \in \mathbb{R}$ *zprava* (resp. *zleva*), jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x) = f(x_0)$ (resp. $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x) = f(x_0)$).

2.2.2 Poznámky

1. Z definice 2.2.1 bezprostředně plyne:
Funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro každé $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ platí $|f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$.
2. Je-li funkce f spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$, pak je v nějakém okolí tohoto bodu ohraničená.
3. Spojitost je definována pouze v bodech z \mathbb{R} . Nelze definovat spojitost v nevlastním bodě.
4. Spojitost funkce je lokální vlastností této funkce.

2.2.3 Terminologická poznámka

Není-li funkce f spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ a je při tom definovaná na nějakém okolí (případně ryzím okolí) bodu x_0 , mohou nastat možnosti:

- A) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ neexistuje
- A1) $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x)$, $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x)$ existují a jsou reálné různé — *bod nespojitosti 1. druhu*
(Např.: $f(x) = [x]$, $x_0 = 1$)
- A2) Alespoň jedna z jednostranných limit neexistuje — *bod nespojitosti 2. druhu*
(Např.: $f(x) = \sin \frac{1}{x}$, $x_0 = 0$; $\chi(x)$, x_0 libovolné)
- A3) $\lim_{x \rightarrow x_0+} f(x)$, $\lim_{x \rightarrow x_0-} f(x)$ existují, jsou různé a alespoň jedna z nich je nevlastní
(Např.: $f(x) = \operatorname{tg}(x)$, $x_0 = \frac{\pi}{2}$)
- B) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$, $a \neq f(x_0)$
- B1) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ je nevlastní
(Např.: $f(x) = \frac{1}{x^2}$, $x_0 = 0$)
- B2) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}$ a $f(x_0) \neq a$ nebo $x_0 \notin \operatorname{Dom} f$ — *bod odstranitelné nespojitosti*
Nespojitost lze odstranit změnou $f(x_0)$ nebo dodefinováním $f(x_0)$:
- $$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x), & x \in \operatorname{Dom} f \setminus \{x_0\} \\ \lim_{x \rightarrow x_0} f(x), & x = x_0 \end{cases}.$$
- (Např.: $f(x) = \begin{cases} x^2, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases}$, $x_0 = 0$, $g(x) = \frac{x-1}{x^2-1}$, $x_0 = 1$)
- Nespojitost odstraníme definováním $\tilde{f}(0) = 0$, $\tilde{g}(1) = \frac{1}{2}$

2.2.4 Věta

Funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když je v tomto bodě spojitá zprava i zleva.

D.: plyne z 2.1.12. \square

2.2.5 Věta

Funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ takovou, že $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ platí $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0)$.

Funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ zprava (resp. zleva) právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ takovou, že $x_n \geq x_0$ (resp. $x_n \leq x_0$) a $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ platí $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0)$.

D.: plyne z 2.1.4 a 2.1.13. \square

2.2.6 Věta

Jsou-li funkce f a g spojité v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$, pak jsou také funkce $|f|$, $f + g$, $f - g$, fg spojité v bodě x_0 . Je-li navíc $g(x_0) \neq 0$, je i funkce $\frac{f}{g}$ spojitá v bodě x_0 .

D.: plyne z 2.1.7.4 \square

2.2.7 Věta

Nechť funkce φ je spojitá v bodě x_0 a funkce f je spojitá v bodě $\varphi(x_0)$. Pak je také funkce $x \mapsto f(\varphi(x))$ spojitá v bodě x_0 .

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K němu existuje $\eta > 0$ takové, že pro $y \in (\varphi(x_0) - \eta, \varphi(x_0) + \eta)$ platí

$$|f(y) - f(\varphi(x_0))| < \varepsilon.$$

K $\eta > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ platí $|\varphi(x) - \varphi(x_0)| < \eta$.

Tedy pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ je $|f(\varphi(x)) - f(\varphi(x_0))| < \varepsilon$, což znamená $\lim_{x \rightarrow x_0} f(\varphi(x)) = f(\varphi(x_0))$. \square

Tato věta není důsledkem 2.1.8, neboť má jiné předpoklady.

2.2.8 Definice

Řekneme, že funkce f je *spojitá na intervalu* $I \subseteq \text{Dom } f$, jestliže platí

- (i) f je spojitá v každém vnitřním bodě intervalu I .
- (ii) Patří-li levý (resp. pravý) krajní bod intervalu I do tohoto intervalu, pak je v něm funkce f spojitá zprava (resp. zleva).

Zejména: Funkce f je spojitá na otevřeném intervalu (a, b) právě tehdy, když je spojitá v každém bodě tohoto intervalu.

Funkce f je spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$ právě tehdy, když je spojitá v každém bodě intervalu (a, b) , v bodě a je spojitá zprava a v bodě b je spojitá zleva.

Spojitost na intervalu je globální vlastnost.

2.2.9 Věta

Nechť funkce f je spojitá a ryze monotónní na intervalu I_1 a zobrazuje tento interval na interval I_2 . Pak funkce inverzní f^{-1} je spojitá na intervalu I_2 .

D.: Nechť f je rostoucí na I_1 , $y_0 \in I_2$, y_0 není levý koncový bod I_2 . Ukážeme, že f^{-1} je spojitá zleva v bodě $y_0 = f(x_0)$:

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné takové, že $x_0 - \varepsilon \in I_1$. Pak $f(x_0 - \varepsilon) < f(x_0)$. Označme $\delta = f(x_0) - f(x_0 - \varepsilon) > 0$.

Buď $y \in (y_0 - \delta, y_0]$ libovolný. Poněvadž podle 1.2.17 je f^{-1} rostoucí, je $f^{-1}(y_0 - \delta) < f^{-1}(y)$.

$f^{-1}(y_0 - \delta) = f^{-1}(f(x_0) - f(x_0) + f(x_0 - \varepsilon)) = x_0 - \varepsilon$, tedy $x_0 - \varepsilon = f^{-1}(y_0) - \varepsilon < f^{-1}(y)$, neboli $f^{-1}(y_0) - f^{-1}(y) < \varepsilon$.

Ostatní možnosti rozebereme analogicky. \square

Z této věty, z 2.2.6, 2.2.7 a z 2.1.9 bezprostředně plyne

2.2.10 Důsledek

Elementární funkce jsou spojité na svém definičním oboru.

2.2.11 Věta (1. Weierstrassova [1815 – 1897])

Funkce spojitá na uzavřeném intervalu je na tomto intervalu ohraničená.

D.: Sporem. Pripustíme, že funkce f spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$ není ohraničená shora.

Pak ke každému $n \in \mathbb{N}$ existuje $x_n \in [a, b]$ takové, že $f(x_n) > n$. Takto definovaná posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je ohraničená ($a \leq x_n \leq b$) a tedy podle 1.3.19.1 existuje posloupnost $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty}$ z ní vybraná a taková, že $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0$.

Poněvadž $a \leq x_{n_k} \leq b$, podle 1.3.5.1 je $a \leq x_0 \leq b$, neboli $x_0 \in [a, b]$.

Poněvadž f je spojitá (případně jednostranně spojitá), podle 2.2.5 je $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x_0) \in \mathbb{R}$.

Současně ale $f(x_{n_k}) > n_k$, $\lim_{k \rightarrow \infty} n_k = \infty$, a tedy podle 1.3.5.1 a poznámky za 1.3.11 je $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = \infty$.

To je spor.

Analogicky vyloučíme možnost, že by funkce f spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$ nebyla ohraničená zdola. \square

Poznámka: Oba předpoklady jsou podstatné.

2.2.12 Věta (2. Weierstrassova [1815 – 1897])

Funkce spojitá na uzavřeném intervalu nabývá na tomto intervalu své největší i nejmenší hodnoty.

D.: Nechť funkce f je spojitá na intervalu $[a, b]$. Podle 2.2.11 je na tomto intervalu ohraničená a tedy existuje $m = \sup\{f(x) : x \in [a, b]\}$. Ukážeme, že existuje $x_1 \in [a, b]$, že $f(x_1) = m$.

Připustíme, že $f(x) < m$ pro každé $x \in [a, b]$. Pak $m - f(x) > 0$ a tedy podle 2.2.6 je funkce $x \mapsto \frac{1}{m - f(x)}$

spojitá. Podle 2.2.11 existuje $K \in \mathbb{R}$, že $\frac{1}{m - f(x)} < K$ pro každé $x \in [a, b]$. Bez újmy na obecnosti lze

předpokládat, že $K > 0$. Tedy $f(x) < m - \frac{1}{K}$. Podle 1.1.6 (s2*) existuje $x_0 \in [a, b]$, že $f(x_0) \geq m - \frac{1}{K}$,

neboli $m - f(x_0) \leq \frac{1}{K}$, $K \leq \frac{1}{m - f(x_0)}$, což je spor.

Analogicky ukážeme, že existuje $x_2 \in [a, b]$, že $x_2 = \inf\{f(x) : x \in [a, b]\}$. \square

2.2.13 Věta (1. Bolzanova [1781 – 1848])

Nechť funkce f je spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$ a nechť platí $f(a)f(b) < 0$. Pak existuje $c \in (a, b)$, že $f(c) = 0$.

D.: Položme $d = \frac{b-a}{2}$. Pak $d \in (a, b)$. Pokud $f(d) = 0$, je $c = d$.

Nechť $f(d) \neq 0$. Jestliže $f(a)f(d) < 0$, položme $a_1 = a$, $b_1 = d$; jestliže $f(a)f(d) > 0$, položme $a_1 = d$, $b_1 = b$.

Jest $b_1 - a_1 = \frac{b-a}{2}$, $f(a)f(b_1) < 0$, $f(a_1)f(b) < 0$, $a_1 \geq a$, $b_1 \leq b$.

Dále položme $d_1 = \frac{b_1 - a_1}{2}$. Pak $d_1 \in (a_1, b_1) \subseteq (a, b)$. Pokud $f(d_1) = 0$, je $c = d_1$.

Nechť $f(d_1) \neq 0$. Jestliže $f(a_1)f(d_1) < 0$, položme $a_2 = a_1$, $b_2 = d_1$; jestliže $f(a_1)f(d_1) > 0$, položme $a_2 = d_1$, $b_2 = b_1$.

Jest $b_2 - a_2 = \frac{b-a}{2^2}$, $f(a)f(b_2) < 0$, $f(a_2)f(b) < 0$, $a_2 \geq a$, $b_2 \leq b_1$.

Analogicky postupujeme dále. Buď po konečném počtu kroků nalezneme d_k takové, že $f(d_k) = 0$, nebo dostaneme dvě posloupnosti $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ takové, že $b_n - a_n = \frac{b-a}{2^n}$, $f(a)f(b_n) < 0$, $f(a_n)f(b) < 0$.

V prvním případě je $c = d_k$. Nechť nastane druhý případ.

$\{a_n\}$ je neklesající, ohraničená shora číslem b a tedy podle 1.3.9 existuje $c_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \leq b$. $\{b_n\}$ je nerostoucí, ohraničená zdola číslem a a tedy existuje $c_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n \geq a$.

Platí $c_1 - c_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n - \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_n - b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a - b}{2^n} = 0$, tedy $c_1 = c_2 = c \in [a, b]$.

Kdyby $f(a)f(c) < 0$ a $f(c)f(b) < 0$, pak by $f(a)f(c)f(c)f(b) > 0$, neboli $f(a)f(b) > 0$, což by byl spor.

Pokud $f(a)f(c) \geq 0$, pak podle 1.3.5.1 je $0 \leq f(a) \lim_{n \rightarrow \infty} f(b_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(a)f(b_n) \leq 0$, tedy $f(a)f(c) = 0$, což je možné jen tak, že $f(c) = 0$.

Pokud $f(c)f(b) \geq 0$, pak $0 \leq (\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n))f(b) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n)f(b) \leq 0$, tedy $f(c)f(b) = 0$, což je možné jen tak, že $f(c) = 0$. \square

2.2.14 Důsledek (Speciální případ Brouwerovy [1881 – 1966] věty o pevném bodě)

Buď f spojitá funkce zobrazující uzavřený interval $[a, b]$ do sebe. Pak existuje $c \in [a, b]$ takové, že $f(c) = c$.

D.: Platí $f(a) \geq a$, $f(b) \leq b$. Pokud $f(a) = a$, položíme $c = a$, pokud $f(b) = b$, položíme $c = b$.

Nechť $f(a) > a$, $f(b) < b$. Definujme funkci g předpisem $g(x) = x - f(x)$.

Funkce g je spojitá na $[a, b]$, $g(a) < 0$, $g(b) > 0$, takže podle 2.2.13 existuje $c \in (a, b)$ takové, že $g(c) = c - f(c) = 0$. \square

2.2.15 Věta (2. Bolzanova [1781 – 1848])

Nechť funkce f je spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$. Pak na tomto intervalu nabývá všech hodnot mezi svou největší a nejmenší hodnotou.

D.: Buďte $M = \max\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $m = \min\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $p \in \mathbb{R}$ takové, že $m < p < M$.

Podle 2.2.12 existují $x_1 \in [a, b]$, $x_2 \in [a, b]$ takové, že $f(x_1) = M$, $f(x_2) = m$.

$f(x_1) - p > 0$, $f(x_2) - p < 0$, tedy $(f(x_1) - p)(f(x_2) - p) < 0$. Podle 2.2.13 existuje v uzavřeném intervalu s krajními body x_1 a x_2 číslo c takové, že $0 = (f - p)(c) = f(c) - p$, tedy $f(c) = p$. \square

2.2.16 Důsledek

Spojitým obrazem uzavřeného intervalu je buď jednoprvková množina nebo uzavřený interval.

2.2.17 Poznámka

Nyní můžeme dokázat tvrzení uvedené za 1.4.19: Je-li $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, $a \neq 1$, $f(x) = a^x$, pak $\text{Im } f = (0, \infty)$.

D.: Nechť $a > 1$. Vzhledem k 1.4.19.1 stačí ukázat, že $(0, \infty) \subseteq \text{Im } f$. Buď tedy $y_0 \in (0, \infty)$ libovolné.

Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} a^n = \infty$, $\lim_{n \rightarrow \infty} a^{-n} = 0$, existují $n_1, n_2 \in \mathbb{N}$, že $a^{-n_1} < y_0 < a^{n_2}$.

Funkce $f(x) = a^x$ je podle 2.2.10 spojitá na $(-\infty, \infty)$, je tedy spojitá na uzavřeném intervalu $[-n_1, n_2]$.

Podle 1.4.19.3 je

$$f(-n_1) = a^{-n_1} < y_0 < a^{n_2} = f(n_2)$$

a tedy podle 2.2.15 existuje $x_0 \in [-n_1, n_2]$ takové, že $f(x_0) = y_0$. To znamená, že $y_0 \in \text{Im } f$.

Platnost tvrzení dokážeme analogicky i v případě $0 < a < 1$. \square

2.2.18 Definice

Řekneme, že funkce f je *stejněměrně spojitá na intervalu* $I \subseteq \text{Dom } f$, jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro každá dvě $x_1, x_2 \in I$ taková, že $|x_1 - x_2| < \delta$ platí $|f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon$.

2.2.19 Poznámky

1. Stejněměrně spojitá funkce na intervalu je na tomto intervalu spojitá.

Spojitá funkce na intervalu nemusí být na tomto intervalu spojitá stejněměrně.

2. Stejněměrná spojitost je globální vlastnost.

3. Necht funkce f je stejnoměrně spojitá na otevřeném intervalu (a, b) .
Podle 2.1.6 existují $\lim_{x \rightarrow a+} f(x) \in \mathbb{R}$, $\lim_{x \rightarrow b-} f(x) \in \mathbb{R}$. Funkce \tilde{f} zadaná předpisem

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} \lim_{x \rightarrow a+} f(x), & x = a \\ f(x), & x \in (a, b) \\ \lim_{x \rightarrow b-} f(x), & x = b \end{cases}$$

je spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$.

(Funkci stejnoměrně spojitou na otevřeném intervalu lze spojitě prodloužit na krajní body tohoto intervalu.)

4. Funkce stejnoměrně spojitá na libovolném intervalu je na tomto intervalu ohraničená.

D.: Plyne z předchozího tvrzení a 2.2.12. \square

2.2.20 Věta (Heine [1821 – 1881] - Cantor [1845 – 1918])

Necht funkce f je spojitá na uzavřeném intervalu $[a, b]$. Pak je na tomto intervalu spojitá stejnoměrně.

D.: Sporem: Pripustme, že f je spojitá na $[a, b]$ nikoliv stejnoměrně. Existuje tedy $\varepsilon_0 > 0$ takové, že ke každému $\delta > 0$ existuje dvojice bodů $x, y \in [a, b]$, že $|x - y| < \delta$ a zároveň $|f(x) - f(y)| \geq \varepsilon_0$.

Zejména tedy pro $\delta = \frac{1}{n}$ existují $x_n, y_n \in [a, b]$, že $|x_n - y_n| < \frac{1}{n}$ a $|f(x_n) - f(y_n)| \geq \varepsilon_0$.

Posloupnost $\{x_n\}$ je ohraničená a tedy podle 1.3.19.2 existuje posloupnost $\{x_{n_k}\}$ vybraná z $\{x_n\}$ taková, že $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \in [a, b]$.

Dále podle 1.3.5.1 $\lim_{k \rightarrow \infty} |x_{n_k} - y_{n_k}| \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{n_k} = 0$, tedy $\lim_{k \rightarrow \infty} |x_{n_k} - y_{n_k}| = 0$, což znamená $\lim_{k \rightarrow \infty} y_{n_k} = x_0$.

Poněvadž f je spojitá v x_0 , je $\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_{n_k}) = f(x_0) = \lim_{k \rightarrow \infty} f(y_{n_k})$. To je spor s $|f(x_{n_k}) - f(y_{n_k})| \geq \varepsilon_0$. \square

2.3 Derivace

2.3.1 Definice

Necht f je funkce a $x_0 \in \mathbb{R}$. Existuje-li vlastní limita $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$, nazýváme ji *derivace funkce f v bodě x_0* a označujeme ji $f'(x_0)$.

Je-li tato limita nevlastní, řekneme, že funkce f má v bodě x_0 *nevlastní derivaci*.

Neexistuje-li tato limita, řekneme, že funkce f *nemá derivaci v bodě x_0* .

2.3.2 Poznámky

- Má-li funkce f derivaci v bodě x_0 , pak je v tomto bodě a nějakém jeho okolí definována. (Existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ bodu x_0 takové, že $\mathcal{O}(x_0) \subseteq \text{Dom } f$.) (Viz 2.1.2.1)
- Funkce f má v libovolném bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ nejvýše jednu derivaci. (Viz 2.1.7.1)
- Derivace je definována pouze v $x_0 \in \mathbb{R}$. Nelze definovat derivaci v ∞ nebo $-\infty$.
- Existence a hodnota derivace $f'(x_0)$ je lokální vlastností funkce f v bodě x_0 .
- Označíme-li $x = x_0 + h$, lze v definici 2.3.1 psát $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$ místo $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$.

6. Lze definovat i *jednostranné derivace* funkce f v bodě x_0 :

$$\text{Derivace zleva } f'_-(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0-} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{h \rightarrow 0+} \frac{f(x_0) - f(x_0 - h)}{h}$$

$$\text{Derivace zprava } f'_+(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{h \rightarrow 0+} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

Funkce f má v bodě x_0 derivaci právě tehdy, když v něm má derivaci zprava a derivaci zleva a platí $f'_+(x_0) = f'_-(x_0)$. (Viz 2.1.12)

7. Necht' $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y = f(x)\}$ vyjadřuje křivku v rovině (s kartézskými souřadnicemi). Rovnice *tečny* k této křivce v bodě $(x_0, f(x_0)) = (x_0, y_0)$ je

$$y - y_0 = f'(x_0)(x - x_0),$$

rovnice *normály* v témže bodě je

$$y - y_0 = -\frac{1}{f'(x_0)}(x - x_0).$$

2.3.3 Věta

Má-li funkce f v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ derivaci, je v tomto bodě spojitá.

D.: Necht' $f'(x_0)$ existuje. Pak

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) &= \lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - f(x_0) + f(x_0)) = \lim_{x \rightarrow x_0} \left(\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} (x - x_0) + f(x_0) \right) = \\ &= f'(x_0) \lim_{x \rightarrow x_0} (x - x_0) + f(x_0) = f'(x_0) \cdot 0 + f(x_0) = f(x_0), \end{aligned}$$

a tvrzení plyne přímo z definice 2.2.1. \square

2.3.4 Poznámky

1. Opačné tvrzení neplatí. Funkce spojitá v bodě x_0 nemusí mít v tomto bodě derivaci.

$$\begin{aligned} \text{Například pro } f(x) = |x| \text{ je } f'_+(x_0) &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{|x| - |0|}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x}{x} = 1, \\ f'_-(x_0) &= \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{|x| - |0|}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{-x}{x} = -1. \end{aligned}$$

2. Analogicky platí: Má-li funkce f v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ derivaci zprava (resp. zleva), pak je v tomto bodě spojitá zprava (resp. zleva).

2.3.5 Věta

Necht' funkce f, g mají derivaci v bodě $x_0 \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$. Pak platí:

- Pro každé $c \in \mathbb{R}$ je $(cf)'(x_0) = cf'(x_0)$.
- $(f + g)'(x_0) = f'(x_0) + g'(x_0)$, $(f - g)'(x_0) = f'(x_0) - g'(x_0)$.
- $(fg)'(x_0) = f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0)$.
- Je-li $g(x_0) \neq 0$, pak $\left(\frac{f}{g}\right)'(x_0) = \frac{f'(x_0)g(x_0) - f(x_0)g'(x_0)}{g^2(x_0)}$.

Analogická tvrzení platí i o jednostranných derivacích.

D.:

- $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{cf(x) - cf(x_0)}{x - x_0} = c \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = cf'(x_0)$.
- $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) \pm g(x) - (f(x_0) \pm g(x_0))}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0) \pm (g(x) - g(x_0))}{x - x_0} = f'(x_0) \pm g'(x_0)$.
- $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x) - f(x_0)g(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)g(x) - f(x_0)g(x) + f(x_0)g(x) - f(x_0)g(x_0)}{x - x_0} =$
 $= \lim_{x \rightarrow x_0} \left[\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} g(x) + f(x_0) \frac{g(x) - g(x_0)}{x - x_0} \right] = f'(x_0)g(x_0) + f(x_0)g'(x_0)$.
 (Poslední rovnost platí, poněvadž podle 2.3.3 je $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = g(x_0)$.)

$$4. \left(\frac{1}{g}\right)'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{1}{g(x)} - \frac{1}{g(x_0)}}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x_0) - g(x)}{x - x_0} \frac{1}{g(x)g(x_0)} = -\frac{g'(x_0)}{g^2(x_0)}.$$

Dokazovaný vztah nyní plyne z předchozího.

□

Tvrzení věty lze stručně zapsat:

$$(cu)' = cu', \quad (u \pm v)' = u' \pm v', \quad (uv)' = u'v + uv', \quad \left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}.$$

Matematickou indukcí lze tvrzení zobecnit:

$$\begin{aligned} (c_1f_1 + c_2f_2 + \dots + c_nf_n)'(x_0) &= c_1f_1'(x_0) + c_2f_2'(x_0) + \dots + c_nf_n'(x_0), \\ (f_1f_2f_3 \dots f_{n-1}f_n)'(x_0) &= f_1'(x_0)f_2(x_0)f_3(x_0) \dots f_{n-1}(x_0)f_n(x_0) + \\ &\quad + f_1(x_0)f_2'(x_0)f_3(x_0) \dots f_{n-1}(x_0)f_n(x_0) + \dots + \\ &\quad + f_1(x_0)f_2(x_0)f_3(x_0) \dots f_{n-1}(x_0)f_n'(x_0). \end{aligned}$$

2.3.6 Věta (o derivaci složené funkce)

Nechť funkce f má derivaci v bodě $u_0 \in \mathbb{R}$ a necht funkce φ má derivaci v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ takovém, že $\varphi(x_0) = u_0$. Pak složená funkce $F : x \mapsto f(\varphi(x))$ má derivaci v bodě x_0 a platí $F'(x_0) = f'(u_0)\varphi'(x_0) = f'(\varphi(x_0))\varphi'(x_0)$.

D.:
$$\frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0} = \frac{f(\varphi(x)) - f(\varphi(x_0))}{\varphi(x) - \varphi(x_0)} \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{x - x_0}.$$

Jestliže existuje ryzí $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že $\varphi(x) \neq \varphi(x_0)$ pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0)$, pak podle 2.1.8 je

$$F'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0} = \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{f(u) - f(u_0)}{u - u_0} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{x - x_0} = f'(u_0)\varphi'(x_0).$$

Nechť v každém ryzím $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ existují body x takové, pro něž $\varphi(x) = \varphi(x_0)$. Ukážeme, že pak $\varphi'(x_0) = 0$ a také $F'(x_0) = 0$, tedy že platí dokazovaný vztah.

Bud' $\{x_n\}$ taková, že $\varphi(x_n) = \varphi(x_0)$, $x_n \neq x_0$, $x_n \rightarrow x_0$. Pak podle 2.1.4

$$\varphi'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\varphi(x) - \varphi(x_0)}{x - x_0} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\varphi(x_n) - \varphi(x_0)}{x_n - x_0} = 0.$$

Bud' nyní $\{x_n\}$ libovolná taková, že $x_n \neq x_0$, $x_n \rightarrow x_0$. Označme

$$A = \{n \in \mathbb{N} : \varphi(x_n) = \varphi(x_0)\}, \quad B = \{n \in \mathbb{N} : \varphi(x_n) \neq \varphi(x_0)\}.$$

Pro $n \in A$ jest
$$\frac{F(x_n) - F(x_0)}{x_n - x_0} = \frac{f(\varphi(x_n)) - f(\varphi(x_0))}{x_n - x_0} = 0.$$

Je-li B konečná, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ je $n \in A$, tedy pro $n \geq n_0$ je $\frac{F(x_n) - F(x_0)}{x_n - x_0} = 0$, což

znamená, že
$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F(x_n) - F(x_0)}{x_n - x_0} = 0.$$

Je-li B nekonečná, existuje vybraná posloupnost $\{x_{n_k}\}_{k=1}^{\infty} \subseteq B$. Dále

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{F(x_{n_k}) - F(x_0)}{x_{n_k} - x_0} &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{f(\varphi(x_{n_k})) - f(\varphi(x_0))}{\varphi(x_{n_k}) - \varphi(x_0)} \frac{\varphi(x_{n_k}) - \varphi(x_0)}{x_{n_k} - x_0} = \\ &= f'(\varphi(x_0)) \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\varphi(x_{n_k}) - \varphi(x_0)}{x_{n_k} - x_0} = 0, \end{aligned}$$

neboť $\lim_{k \rightarrow \infty} \varphi(x_{n_k}) = \varphi(x_0)$, jelikož φ je spojitá v x_0 . Z 2.1.4 plyne $F'(x_0) = 0$. □

2.3.7 Věta (o derivaci inverzní funkce)

Nechť funkce f je ryze monotonní a spojitá na intervalu J . Necht' y_0 je vnitřní bod intervalu J a necht' funkce f má v tomto bodě derivaci $f'(y_0) \neq 0$. Pak funkce f^{-1} inverzní k funkci f má derivaci v bodě $x_0 = f(y_0)$ a platí $(f^{-1})'(x_0) = \frac{1}{f'(y_0)}$.

D.: Poněvadž f je ryze monotonní, pro $x \neq x_0$ platí $y = f^{-1}(x) \neq f^{-1}(x_0) = y_0$. Tedy podle 2.1.8 platí:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f^{-1}(x) - f^{-1}(x_0)}{x - x_0} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{\frac{x - x_0}{f^{-1}(x) - f^{-1}(x_0)}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{\frac{f(f^{-1}(x)) - f(f^{-1}(x_0))}{f^{-1}(x) - f^{-1}(x_0)}} = \\ &= \lim_{y \rightarrow y_0} \frac{1}{\frac{f(y) - f(y_0)}{y - y_0}} = \frac{1}{f'(y_0)}. \end{aligned}$$

(Předposlední rovnost plyne ze spojitosti funkce f .) \square

2.3.8 Definice

Buď $M \subseteq \text{Dom } f$ množina bodů, v nichž má funkce f derivaci. Pak zobrazení $x_0 \mapsto f'(x_0)$ je funkcí s definičním oborem M . Tato funkce se nazývá *derivace funkce f* a označuje se f' .

2.3.9 Přehled vzorců pro derivaci

- | | |
|--|--|
| (1) pro každé $c \in \mathbb{R}$ je $c' = 0$ | (11) $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ |
| (2) $(x^a)' = ax^{a-1}$ | (12) $(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ |
| (3) $(e^x)' = e^x$ | (13) $(\arctg x)' = \frac{1}{1+x^2}$ |
| (4) $(a^x)' = a^x \ln a$ | (14) $(\text{arccotg } x)' = -\frac{1}{1+x^2}$ |
| (5) $(\ln x)' = \frac{1}{x}$ | (15) $(cu)' = cu'$ |
| (6) $(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$ | (16) $(u \pm v)' = u' \pm v'$ |
| (7) $(\sin x)' = \cos x$ | (17) $(uv)' = u'v + uv'$ |
| (8) $(\cos x)' = -\sin x$ | (18) $\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}$ |
| (9) $(\text{tg } x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$ | (19) $(u^v)' = u^v \left(v' \ln u + v \frac{u'}{u}\right)$ |
| (10) $(\text{cotg } x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$ | (20) $(f(\varphi(x)))' = f'(\varphi(x))\varphi'(x)$ |

D.:

- (1) $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{c - c}{x - x_0} = 0$.
- (3) $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^{x_0+h} - e^{x_0}}{h} = e^{x_0} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^h - 1}{h}$ a vzorec plyne z 2.1.14.
- (5) Podle 2.3.7 je $(\ln x)' = \frac{1}{e^y} = \frac{1}{e^{\ln x}} = \frac{1}{x}$.
- (2) S využitím 2.3.6 dostaneme $(x^a)' = (e^{a \ln x})' = e^{a \ln x} (a \ln x)' = x^a \frac{a}{x} = ax^{a-1}$.
- (4) $(a^x)' = (e^{x \ln a})' = e^{x \ln a} (x \ln a)' = a^x (x)' \ln a = a^x \ln a$.
- (6) $(\log_a x)' = \left(\frac{\ln x}{\ln a}\right)' = \frac{1}{\ln a} (\ln x)' = \frac{1}{x \ln a}$.
- (7) S využitím 2.1.9.9 dostaneme

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin x}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x \cos h + \cos x \sin h - \sin x}{h} =$$

$$= \sin x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} + \cos x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} = \sin x \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} + \cos x.$$

$$\text{Dále } \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos h - 1}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos^2 h - 1}{h(\cos h + 1)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-\sin^2 h}{h(\cos h + 1)} = -\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{h} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h}{\cos h + 1} = 1 \cdot 0 = 0.$$

$$(8) (\cos x)' = (\sin(x + \frac{\pi}{2}))' = \cos(x + \frac{\pi}{2}) \cdot 1 = -\sin x.$$

$$(9) (\operatorname{tg} x)' = \left(\frac{\sin x}{\cos x} \right)' = \frac{\cos^2 x + \sin^2 x}{\cos^2 x} = \frac{1}{\cos^2 x}.$$

$$(10) (\operatorname{cotg} x)' = \left(\frac{\cos x}{\sin x} \right)' = \frac{-\sin^2 x - \cos^2 x}{\sin^2 x} = -\frac{1}{\sin^2 x}.$$

$$(11) \text{ Podle 2.3.7 je } (\arcsin x)' = \frac{1}{(\sin y)'} = \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 y}} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}.$$

$$(12) \text{ Podle 2.3.7 je } (\arccos x)' = \frac{1}{(\cos y)'} = -\frac{1}{\sin y} = -\frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2 y}} = -\frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}.$$

$$(13) \text{ Podle 2.3.7 je } (\arctg x)' = \frac{1}{(\operatorname{tg} y)'} = \frac{1}{\frac{1}{\cos^2 y}} = \frac{1}{\frac{\sin^2 y + \cos^2 y}{\cos^2 y}} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 y + 1} = \frac{1}{x^2 + 1}.$$

$$(14) \text{ Podle 2.3.7 je } (\operatorname{arccotg} x)' = \frac{1}{(\operatorname{cotg} y)'} = \frac{1}{-\frac{1}{\sin^2 y}} = \frac{1}{-\frac{\sin^2 y - \cos^2 y}{\cos^2 y}} = -\frac{1}{x^2 + 1}.$$

(15)-(18) 2.3.5

$$(19) (u^v)' = (e^{v \ln u})' = e^{v \ln u} \left(v' \ln u + v \frac{u'}{u} \right) = u^v \left(v' \ln u + v \frac{u'}{u} \right).$$

(20) 2.3.6

□

2.3.10 Příkladky

$$1. y = \arccos \sqrt{\frac{ax^2 + 1}{bx^2 + 1}}, \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad 0 < a < b.$$

$$\begin{aligned} y' &= -\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{ax^2 + 1}{bx^2 + 1}}} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{bx^2 + 1}{ax^2 + 1}} \frac{2ax(bx^2 + 1) - 2bx(ax^2 + 1)}{(bx^2 + 1)^2} = \\ &= -\frac{(bx^2 + 1)(abx^3 + ax - abx^3 - bx)}{\sqrt{bx^2 - ax^2} \sqrt{ax^2 + 1} (bx^2 + 1)^2} = -\frac{(a - b)x}{|x| \sqrt{b - a} \sqrt{ax^2 + 1} (bx^2 + 1)} = \\ &= \operatorname{sgn} x \frac{\sqrt{b - a}}{\sqrt{ax^2 + 1} (bx^2 + 1)}. \end{aligned}$$

$$2. y = \sqrt[x]{x} = x^{\frac{1}{x}} = e^{\frac{1}{x} \ln x}.$$

$$y' = \sqrt[x]{x} \left(-\frac{1}{x^2} \ln x + \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{x} \right) = \frac{\sqrt[x]{x}}{x^2} (1 - \ln x)$$

3. Napište rovnici tečny a normály k hyperbole $xy = 1$ v bodě $A = (\frac{1}{2}, 2)$.

$$y = \frac{1}{x}, \quad y' = -\frac{1}{x^2}, \quad y'(\frac{1}{2}) = -4.$$

$$\begin{array}{ll} \text{tečna:} & y - 2 = -4(x - \frac{1}{2}) \\ & 2y - 4 = -8x + 4 \\ & 4x + y - 4 = 0 \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{normála:} & y - 2 = \frac{1}{4}(x - \frac{1}{2}) \\ & 8y - 16 = 2x - 1 \\ & 2x - 8y + 15 = 0 \end{array}$$

$$4. y = \sqrt[3]{x}, \quad x_0 = 0.$$

$$y' = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{x^2}} \text{ pro } x \neq 0, \quad \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{x^2}} = \infty, \text{ derivace v bodě } 0 \text{ je nevlastní.}$$

5. $y = \sqrt[3]{x^2}$, $x_0 = 0$.

$$y'_+ = \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{x}}, y'_+(0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{x}} = +\infty$$

$$y'_-(0) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt[3]{x}} = -\infty$$

Funkce tedy nemá v bodě 0 derivaci ani nevlastní derivaci.

6. $y = \operatorname{sgn} x$, $x_0 = 0$

$$(\operatorname{sgn} x)'_{x=0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{sgn} x - \operatorname{sgn} 0}{x - 0} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{sgn} x}{x} = \infty$$

Pro nevlastní derivaci neplatí tvrzení věty 2.3.3. (Proto také nevlastní derivaci nepovažujeme za derivaci.)

2.4 Derivace vyšších řádů, diferenciál

2.4.1 Definice

Buď f funkce, která má derivaci na množině $M_1 \subseteq \operatorname{Dom} f$ a buď $x_0 \in M_1$. Má-li funkce f' derivaci v bodě x_0 , nazýváme tuto derivaci *druhou derivací funkce f v bodě x_0* a značíme ji $f''(x_0)$.

Obecně: Buď f funkce, která má na množině $M_{n-1} \subseteq \operatorname{Dom} f$ $(n-1)$ -tou derivaci $f^{(n-1)}$ a buď $x_0 \in M_{n-1}$. Má-li funkce $f^{(n-1)}$ derivaci v bodě x_0 , nazýváme tuto derivaci *n -tou derivací funkce f v bodě x_0* a značíme ji $f^{(n)}(x_0)$.

2.4.2 Vzorce pro n -tou derivaci

$$(1) \quad (x^a)^{(n)} = a(a-1) \cdots (a-n+1)x^{a-n} \qquad (2) \quad (e^x)^{(n)} = e^x$$

$$(3) \quad (a^x)^{(n)} = a^x \ln^n a \qquad (4) \quad (\ln x)^{(n)} = (-1)^{n-1} \frac{(n-1)!}{x^n}$$

$$(5) \quad (\sin x)^{(n)} = \sin\left(x + n\frac{\pi}{2}\right) \qquad (6) \quad (\cos x)^{(n)} = \cos\left(x + n\frac{\pi}{2}\right)$$

$$(7) \quad (uv)^{(n)} = \binom{n}{0} u^{(n)}v + \binom{n}{1} u^{(n-1)}v' + \cdots + \binom{n}{n-1} u'v^{(n-1)} + \binom{n}{n} uv^{(n)} = \\ = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} u^{(n-i)}v^{(i)} \quad (\text{Leibnizova formule})$$

D.: Ve všech případech matematickou indukcí. První krok indukce vždy bezprostředně plyne z 2.3.9. Ukážeme indukční krok.

$$(1) \quad (x^a)^{(n)} = ((x^a)^{(n-1)})' = (a(a-1) \cdots (a-n+2)x^{a-n+1})' = a(a-1) \cdots (a-n+2) (x^{a-n+1})' = \\ = a(a-1) \cdots (a-n+2)(a-n+1)x^{a-n}$$

$$(2) \quad (e^x)^{(n)} = ((e^x)^{(n-1)})' = (e^x)' = e^x$$

$$(3) \quad (a^x)^{(n)} = ((a^x)^{(n-1)})' = (a^x \ln^{n-1} a)' = (a^x)' \ln^{n-1} a = (a^x \ln a) \ln^{n-1} a = a^x \ln^n a$$

$$(4) \quad (\ln x)^{(n)} = ((\ln x)^{(n-1)})' = \left((-1)^{n-2} \frac{(n-2)!}{x^{n-1}} \right)' = (-1)^{n-2} (n-2)! \frac{(-n+1)}{x^n} = (-1)^{n-1} \frac{(n-1)!}{x^n}$$

$$(5) \quad (\sin x)^{(n)} = ((\sin x)^{(n-1)})' = (\sin(x + (n-1)\frac{\pi}{2}))' = \cos(x + (n-1)\frac{\pi}{2}) = \sin(x + n\frac{\pi}{2})$$

(6) Analogicky jako (5)

$$(7) \quad (uv)^{(n)} = ((uv)^{(n-1)})' = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} u^{(n-1-i)}v^{(i)} \right)' = \\ = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} (u^{(n-i)}v^{(i)} + u^{(n-1-i)}v^{(i+1)}) = \\ = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} u^{(n-i)}v^{(i)} + \sum_{i=1}^n \binom{n-1}{i-1} u^{(n-i)}v^{(i)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \binom{n-1}{0} u^{(n)}v + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\binom{n-1}{i} + \binom{n-1}{i-1} \right] u^{(n-i)}v^{(i)} + \binom{n-1}{n-1} uv^{(n)} = \\
&= u^{(n)}v + \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n}{i} u^{(n-i)}v^{(i)} + uv^{(n)} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} u^{(n-i)}v^{(i)} \quad \square
\end{aligned}$$

2.4.3 Definice

Buď f funkce definovaná v nějakém okolí bodu $x_0 \in \mathbb{R}$. Řekneme, že tato funkce je *diferencovatelná v bodě x_0* , jestliže existuje $\delta \in \mathbb{R}$, $\delta > 0$ takové, že $(x_0 - \delta, x_0 + \delta) \subseteq \text{Dom } f$, a existuje funkce $\tau : (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \rightarrow \mathbb{R}$ taková, že $\lim_{h \rightarrow 0} \tau(h) = 0$ a existuje $a \in \mathbb{R}$ takové, že pro $h \in \mathbb{R}$, $|h| < \delta$ je $f(x_0 + h) - f(x_0) = ah + h\tau(h)$.

V tomto případě se lineární funkce $h \mapsto ah$ nazývá *diferenciál funkce f v bodě x_0* a značí se $df(x_0)$.

2.4.4 Poznámky

1. Vyjádření $f(x_0 + h) - f(x_0) = ah + h\tau(h)$ je možné při libovolném $a \in \mathbb{R}$. Stačí položit

$$\tau(h) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - ah}{h}.$$

Podstatné je však volit a tak, aby $\lim_{h \rightarrow 0} \tau(h) = 0$.

2. Rozdíl $f(x_0 + h) - f(x_0)$ se nazývá *přírůstek funkce f v bodě x_0 při přírůstku h nezávisle proměnné* a značí se $\Delta f(x_0)(h)$, stručně $\Delta f(x_0)$.

Pro diferencovatelnou funkci platí $\Delta f(x_0)(h) = df(x_0)(h) + h\tau(h)$.

2.4.5 Věta

Funkce f je diferencovatelná v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když má v tomto bodě derivaci. V tomto případě $a = f'(x_0)$.

D.:

$$\Rightarrow: f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} (a + \tau(h)) = a + \lim_{h \rightarrow 0} \tau(h) = a.$$

\Leftarrow : Nechť f má derivaci v bodě x_0 . Položme $a = f'(x_0)$, $\tau(h) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - f'(x_0)h}{h}$. Pak

$$\lim_{h \rightarrow 0} \tau(h) = \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} - f'(x_0) \right) = f'(x_0) - f'(x_0) = 0.$$

□

Platí tedy $df(x_0)(h) = f'(x_0) \cdot h$, $\frac{df(x_0)(h)}{h} = f'(x_0)$; stručně $\frac{df(x_0)}{h} = f'(x_0)$

Z tohoto vyjádření plyne geometrická interpretace diferenciálu: Diferenciál je přírůstek funkce naměřený na tečně, tedy $\Delta f(x_0) \approx df(x_0)$. Toho lze využít k přibližnému výpočtu funkčních hodnot.

Například: Výpočet $\sqrt{4.02}$. $f(x) = \sqrt{x}$, $x_0 = 4$, $h = 0.02$, $f(x_0) = \sqrt{4} = 2$
 $f'(x) = \frac{1}{2\sqrt{x}}$, $f'(4) = \frac{1}{2\sqrt{4}} = \frac{1}{4}$, $df(4) = f'(4) \cdot h = \frac{0.02}{4} = 0.005$
 $f(x_0 + h) = f(x_0) + \Delta f(x_0) \approx f(x_0) + df(x_0) = 2 + 0.005 = 2.005$
(Přesná hodnota je 2.00499)

Je-li $f(x) = x$, pak $f'(x_0) = 1$ pro každé $x_0 \in \mathbb{R}$, $df(x_0)(h) = h$, stručně $dx = h$. Lze tedy psát $df(x_0) = f'(x_0)dx$, neboli $f'(x_0) = \frac{df(x_0)}{dx}$, stručně $f' = \frac{df}{dx}$. Je-li $y = f(x)$, lze psát $y' = \frac{dy}{dx}$.

Za použití této symboliky dostanou názorný tvar vzorce pro

- derivaci složené funkce: $\frac{df}{dx} = \frac{df}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dx}$.
- derivaci inverzní funkce: $\frac{df^{-1}}{dy} = \frac{1}{\frac{df}{dx}} = \frac{dx}{df}$, neboli $\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}}$.

2.4.6 Poznámka — zavedení diferenciálů vyšších řádů

Nechť funkce f má v bodě x_0 n -tou derivaci $f^{(n)}(x_0)$, $n \geq 1$. n -tý diferenciál (diferenciál n -tého řádu) definujeme jako zobrazení $d^n f(x_0) : h \mapsto f^{(n)}(x_0) \cdot h^n$, symbolicky $d^n f(x_0) = f^{(n)}(x_0) dx^n$.

Za použití této symboliky lze n -tou derivaci zapsat $f^{(n)}(x) = \frac{d^n f(x)}{dx^n} = \frac{d^n y}{dx^n}$.

2.5 Obecné věty o derivaci

2.5.1 Věta (Rolle [1652 – 1719])

Nechť funkce f splňuje předpoklady:

- je spojitá na $[a, b]$,
- v každém bodě intervalu (a, b) má vlastní nebo nevlastní derivaci,
- $f(a) = f(b)$.

Pak existuje $c \in (a, b)$ takové, že platí $f'(c) = 0$.

D.: Je-li f konstantní, lze podle 2.3.9.1 za c vzít libovolný bod z (a, b) .

Nechť f není konstantní. Podle 2.2.12 existuje $c \in (a, b)$ takové, že $f(c) = \max\{f(x) : x \in [a, b]\}$.

Nechť nejprve $f(c) > f(a) = f(b)$.

Podle (ii) existuje $f'(c) \in \mathbb{R}^*$. Pripusťme $f'(c) > 0$, tedy $\lim_{x \rightarrow c} \frac{f(x) - f(c)}{x - c} > 0$.

Existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(c) \setminus \{c\}$ takové, že pro $x \in \mathcal{O}(c) \setminus \{c\}$ je $\frac{f(x) - f(c)}{x - c} > 0$.

Zvolme $x_1 \in [a, b] \cap (\mathcal{O}(c) \setminus \{c\})$, $x_1 > c$. Pak $x_1 - c > 0$, $f(x_1) - f(c) \leq 0$, tedy $\frac{f(x_1) - f(c)}{x_1 - c} \leq 0$, což je spor.

Analogicky vyloučíme možnost $f'(c) < 0$. Je tedy $f'(c) = 0$.

Pokud $f(a) = f(b) = \max\{f(x) : x \in [a, b]\}$, položíme $c = \min\{f(x) : x \in [a, b]\}$ a provedeme analogické úvahy. \square

Z důkazu plyne, že za c lze volit bod, v němž nabývá funkce f své extrémní hodnoty. Neplyne z něho, že jiné body s vlastností $f'(c) = 0$ neexistují.

Všechny tři předpoklady věty jsou podstatné.

2.5.2 Důsledek

Buď f funkce spojitá na intervalu J , která má na tomto intervalu n -tou derivaci. Má-li f na J n kořenů (t.j. existují $x_0, x_1, \dots, x_n \in J$, že $f(x_0) = f(x_1) = \dots = f(x_n) = 0$), pak existuje $c \in J$ takové, že $f^{(n)}(c) = 0$.

D.: Volme označení tak, že $x_0 < x_1 < \dots < x_n$.

Na intervalech $[x_i, x_{i+1}] \subseteq J$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ splňuje f předpoklady Rolleovy věty. Existují tedy $c_i^1 \in (x_i, x_{i+1}) \subseteq J$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ taková, že $f'(c_i^1) = 0$.

Na intervalech $[c_i^1, c_{i+1}^1] \subseteq J$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-2$ splňuje f' předpoklady Rolleovy věty. Existují tedy $c_i^2 \in (c_i^1, c_{i+1}^1) \subseteq J$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-2$ taková, že $f''(c_i^2) = 0$.

Analogicky postupujeme dále.

V $n-1$ -ním kroku ukážeme, že existují $c_0^{n-1}, c_1^{n-1} \in J$ taková, že $f^{(n-1)}(c_0^{n-1}) = f^{(n-1)}(c_1^{n-1}) = 0$.

Na intervalu $[c_0^{n-1}, c_1^{n-1}]$ splňuje tedy $f^{(n-1)}$ předpoklady Rolleovy věty a tedy existuje

$c \in (c_0^{n-1}, c_1^{n-1}) \subseteq J$ takové, že $f^{(n)}(c) = 0$. \square

2.5.3 Věta (Lagrange [1736 – 1813], 1. věta o střední hodnotě, věta o přírůstku funkce)

Nechť funkce f splňuje předpoklady:

- (i) je spojitá na $[a, b]$,
- (ii) v každém bodě intervalu (a, b) má vlastní nebo nevlastní derivaci.

Pak existuje $c \in (a, b)$ takové, že platí $f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$.

D.: Položme $F(x) = (b - a)f(x) - (f(b) - f(a))x$. Funkce F splňuje předpoklady 2.5.1:

- (i): plyne z 2.2.6
- (ii): plyne z 2.3.9(2) a 2.3.5.
- (iii): $F(a) = (b - a)f(a) - (f(b) - f(a))a = f(a)(b - a + a) - f(b)a = bf(a) - af(b)$
 $F(b) = (b - a)f(b) - (f(b) - f(a))b = f(b)(b - a - b) + f(a)b = bf(a) - af(b)$

Existuje tedy $c \in (a, b)$, že $F'(c) = 0$.

$F'(x) = (b - a)f'(x) - (f(b) - f(a))$, $0 = F'(c) = (b - a)f'(c) - (f(b) - f(a))$, z čehož $f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$.

□

2.5.4 Důsledky

1. Splňuje-li funkce f na intervalu $[a, b]$ předpoklady 2.5.3, pak pro libovolná $x_1, x_2 \in [a, b]$, $x_1 \neq x_2$ existuje ξ mezi x_1 a x_2 tak, že platí $f'(\xi) = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}$, neboli $f(x_2) - f(x_1) = f'(\xi)(x_2 - x_1)$.
 $f(x_2) - f(x_1)$ — přírůstek funkce f mezi body x_1, x_2 . Odtud je odvozen jeden z názvů věty.

2. Nechť funkce f je spojitá na $[a, b]$ a nechť pro každé $x \in (a, b)$ je $f'(x) = 0$. Pak je f konstantní na $[a, b]$.

D.: Buďte $x_1, x_2 \in [a, b]$ libovolné. Pak podle předchozího $f(x_2) = f'(\xi)(x_2 - x_1) + f(x_1) = f(x_1)$. □

3. Nechť funkce f, g jsou spojité na $[a, b]$. Mají-li f, g vlastní nebo nevlastní derivaci na $[a, b]$ a platí-li $f'(x) = g'(x)$ pro každé $x \in (a, b)$, pak existuje $c \in \mathbb{R}$ taková konstanta, že $f(x) = g(x) + c$ identicky na $[a, b]$.

D.: Položme $h(x) = f(x) - g(x)$. Pak $h'(x) = f'(x) - g'(x) = 0$ a podle předchozího $h(x) = c$. □

2.5.5 Věta (Cauchy [1789 – 1857], 2. věta o střední hodnotě, věta o podílu přírůstků funkce)

Nechť funkce f, g splňují předpoklady:

- (i) jsou spojité na $[a, b]$,
- (ii) v každém bodě intervalu (a, b) existuje vlastní nebo nevlastní derivace $f'(x)$ a vlastní derivace $g'(x) \neq 0$.

Pak existuje $c \in (a, b)$ takové, že platí $\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f'(c)}{g'(c)}$.

D.: g splňuje předpoklady 2.5.3, existuje tedy $d \in (a, b)$ takové, že $\frac{g(b) - g(a)}{b - a} = g'(d) \neq 0$, z čehož plyne $g(b) - g(a) \neq 0$, takže zlomek na levé straně tvrzení věty má smysl.

Položme $F(x) = (g(b) - g(a))f(x) - (f(b) - f(a))g(x)$. Přímou ověříme, že tato funkce splňuje předpoklady 2.5.1. Existuje tedy $c \in (a, b)$ takové, že $F'(c) = 0$.

Tedy $0 = (g(b) - g(a))f'(c) - (f(b) - f(a))g'(c)$, z čehož plyne tvrzení. □

$x = g(t)$
 $y = f(t)$ $t \in [a, b]$ — parametrické vyjádření nějaké křivky.

$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)}$ — směrnice sečny, vedené body $A = (g(a), f(a))$, $B = (g(b), f(b))$.

$y = f(g^{-1}(x))$, $y' = \frac{f'(g^{-1}(x))}{g'(t)} = \frac{f'(t)}{g'(t)}$, tedy $\frac{f'(c)}{g'(c)}$ je směrnice tečny v bodě $C = (g(c), f(c))$.

Z důkazu Lagrangeovy věty je vidět, že Lagrangeova věta je důsledkem Rolleovy věty. Z důkazu Cauchyovy věty je vidět, že Cauchyova věta je důsledkem současně Rolleovy a Lagrangeovy věty. Bezprostředně je ale vidět, že Lagrangeova věta je důsledkem Cauchyovy věty a Rolleova věta je důsledkem Lagrangeovy věty. Všechny tři věty jsou tedy ekvivalentní.

2.5.6 Věta (Johann Bernoulli [1667 – 1748], de l'Hospitalovo pravidlo [1696])

Nechť f, g jsou funkce, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ a necht' $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$ nebo $\lim_{x \rightarrow x_0} |g(x)| = \infty$.

Existuje-li $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} \in \mathbb{R}^*$, existuje i $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$ a platí $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$.

Stejně tvrzení platí i pro jednostranné limity.

Je-li $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$ a funkce $\frac{f'}{g'}$ je spojitá v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$, důkaz je snadný:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)} = \frac{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}}{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x) - g(x_0)}{x - x_0}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{g(x) - g(x_0)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - 0}{g(x) - 0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}.$$

Důkazy de l'Hospitalova pravidla v ostatních případech lze nalézt v literatuře.

Poznámka: Jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$ nebo $\lim_{x \rightarrow x_0} |g(x)| = \infty$ a $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$ neexistuje, nelze z toho usuzovat nic o existenci a hodnotě $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$.

Například $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x - \sin x}{x - \cos x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - \frac{\sin x}{x}}{1 - \frac{\cos x}{x}} = \frac{1 - 0}{1 - 0} = 1$, ale $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(x - \sin x)'}{(x - \cos x)'} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - \cos x}{1 + \sin x}$ neexistuje.

2.5.7 Zobecnění:

Nechť $n \in \mathbb{N}$ a necht' pro $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ platí $\lim_{x \rightarrow x_0} f^{(k)}(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g^{(k)}(x) = 0$ nebo $\lim_{x \rightarrow x_0} |g^{(k)}(x)| = \infty$.

Existuje-li $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f^{(n)}(x)}{g^{(n)}(x)}$, existuje i $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$ a obě limity jsou shodné.

Jinými slovy: de l'Hospitalovo pravidlo lze používat opakovaně

2.5.8 Poznámka o neurčitých výrazech

Nechť f, g jsou funkce, $x_0 \in \mathbb{R}^*$ takové, že $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}^*$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b \in \mathbb{R}^*$.

1. $a = b = 0$, typ $\frac{0}{0}$: $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$.

2. $a = \pm\infty, b = \pm\infty$, typ $\frac{\infty}{\infty}$: $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$.

3. $a = 0, b = \pm\infty$, typ $0 \cdot \infty$: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{\frac{1}{g(x)}} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{g(x)}{\frac{1}{f(x)}}$, což je některý z předchozích typů.

$$4. a = b = \pm\infty, \text{ typ } \infty - \infty: \quad \lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - g(x)) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\frac{1}{g(x)} - \frac{1}{f(x)}}{\frac{1}{f(x)g(x)}}, \text{ což je typ } \frac{0}{0}.$$

$$5. a = b = 0, \text{ typ } 0^0: \quad f(x)^{g(x)} = e^{g(x) \ln f(x)}, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)^{g(x)} = e^{\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) \ln f(x)}, \text{ což je typ } 0 \cdot \infty.$$

$$6. a = \infty, b = 0, \text{ typ } \infty^0: \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)^{g(x)} = e^{\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) \ln f(x)}, \text{ což je typ } 0 \cdot \infty.$$

$$7. a = 1, b = \infty, \text{ typ } 1^\infty: \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)^{g(x)} = e^{\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) \ln f(x)}, \text{ což je typ } \infty \cdot 0.$$

2.6 Taylorův vzorec

2.6.1 Označení

Buďte f, g funkce, $x_0 \in \mathbb{R}^*$.

Symbol $f(x) = O(g(x)), x \rightarrow x_0$, stručněji $f = O(g), x \rightarrow x_0$ značí: existuje okolí $\mathcal{O}(x_0) \subseteq \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$ bodu x_0 a konstanta $k \in \mathbb{R}$ tak, že pro všechna $x \in \mathcal{O}(x_0)$ platí $|f(x)| \leq k|g(x)|$. Někdy se v takovém případě říká, že funkce f je malá řádu g .

Symbol $f(x) = o(g(x)), x \rightarrow x_0$, stručněji $f = o(g), x \rightarrow x_0$ značí $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$. Někdy se v takovém případě říká, že funkce f je nekonečně malá řádu g .

2.6.2 Definice

Buďte f, g spojité funkce, $x_0 \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$, $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. Řekneme, že funkce f, g mají v bodě x_0 styk řádu alespoň n , jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - g(x)}{(x - x_0)^n} = 0$.

Funkce f, g mají v bodě x_0 styk řádu alespoň n , pokud $f(x) - g(x) = o((x - x_0)^n), x \rightarrow x_0$.

Poznámka: Je-li rovinná křivka grafem funkce f , která má v $x_0 \in \text{Dom } f$ derivaci a funkce g je dána předpisem $g(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$, pak funkce f a g mají v bodě x_0 styk řádu alespoň 1. (Tečna ke grafu funkce má s grafem funkce styk řádu alespoň 1.)

$$\text{D.: } \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - g(x)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0) - f'(x_0)(x - x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} - f'(x_0) = 0 \quad \square$$

2.6.3 Věta

Nechť $n \in \mathbb{N}$ a funkce f, g mají v bodě $x_0 \in \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$ spojitou n -tou derivaci. Funkce f a g mají v bodě x_0 styk řádu alespoň n právě tehdy, když platí

$$f(x_0) = g(x_0), f'(x_0) = g'(x_0), f''(x_0) = g''(x_0), \dots, f^{(n)}(x_0) = g^{(n)}(x_0).$$

D.: V obou částech důkazu budeme používat označení $F(x) = f(x) - g(x)$, $G_k(x) = (x - x_0)^k$ pro $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$. Poněvadž existuje $F^{(n)}(x_0)$, existují na jistém okolí bodu x_0 i $F^{(k)}$ pro $k \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ a jsou to podle 2.3.3 funkce spojité v bodě x_0 .

Podle 2.4.2.1 je $G_k^{(l)}(x) = k(k-1) \cdots (k-l+1)(x-x_0)^{k-l}$. Všechny funkce $G_k^{(l)}$ jsou v bodě x_0 spojité a platí $G_k^{(l)}(x_0) = \begin{cases} 0, & l \neq k \\ k!, & l = k \end{cases}$.

\Leftarrow : Nechť $F(x_0) = F'(x_0) = F''(x_0) = \dots = F^{(n)}(x_0) = 0$. Pak s využitím 2.5.7 platí

$$0 = \frac{F^{(n)}(x_0)}{n!} = \frac{F^{(n)}(x_0)}{G_n^{(n)}(x_0)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F^{(n)}(x)}{G_n^{(n)}(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{G_n(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{(x - x_0)^n}.$$

\Rightarrow : Necht' $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{(x-x_0)^n} = 0$.

Kdyby existovalo $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ takové, že $F(x_0) = F'(x_0) = F''(x_0) = \dots = F^{(k-1)}(x_0) = 0$ a $F^{(k)}(x_0) \neq 0$, pak by s využitím 2.5.7 platilo

$$\begin{aligned} 0 &\neq \frac{F^{(k)}(x_0)}{k!} = \frac{F^{(k)}(x_0)}{G_k^{(k)}(x_0)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F^{(k)}(x)}{G_k^{(k)}(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{G_k(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{(x-x_0)^k} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x)}{(x-x_0)^n} (x-x_0)^{n-k} = 0, \end{aligned}$$

což by byl spor.

□

2.6.4 Definice

Bud' funkce, $a \in \text{Dom } f$. Necht' funkce f má v bodě a derivace až do n -té včetně. Polynom

$$T_{n,f,a}(x) = T_n(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)}{k!}(x-a)^k$$

se nazývá *Taylorův polynom stupně n funkce f v bodě a (se středem a)*.

Je-li $a = 0$, nazývá se tento polynom *Maclaurinův*.

2.6.5 Věta

Pro Taylorův polynom platí

$$T_n(a) = f(a), \quad T_n'(a) = f'(a), \quad T_n''(a) = f''(a), \quad \dots, \quad T_n^{(n)}(a) = f^{(n)}(a).$$

D.: $T_n(a) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(a-a) + \frac{f''(a)}{2!}(a-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(a-a)^n = f(a)$

$$T_n'(x) = \frac{f'(a)}{1!} + \frac{f''(a)}{2!}2(x-a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}n(x-a)^{n-1}; \quad T_n'(a) = f'(a)$$

$$T_n''(x) = \frac{f''(a)}{2!}2 + \frac{f'''(a)}{3!}3 \cdot 2 \cdot (x-a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}n(n-1)(x-a)^{n-2}; \quad T_n''(a) = f''(a)$$

⋮

$$T_n^{(n)}(x) = \frac{f^{(n)}(a)}{n!}n(n-1) \dots 2; \quad T_n^{(n)}(a) = f^{(n)}(a) \quad \square$$

Z vět 2.6.3 a 2.6.5 bezprostředně plyne

2.6.6 Důsledek

Necht' funkce f má v bodě $a \in \text{Dom } f$ n -tou derivaci a necht' $T_{n,f,a}$ je Taylorův polynom stupně n funkce f v bodě a . Pak funkce f a $T_{n,f,a}$ mají v bodě x_0 styk řádu alespoň n .

2.6.7 Příklad (Maclaurinovy polynomy některých elementárních funkcí)

1. $f(x) = e^x$

$$f(x) = f'(x) = f''(x) = \dots = f^{(n)}(x) = e^x, \text{ tedy } f(0) = f'(0) = f''(0) = \dots = f^{(n)}(0) = 1$$

$$T_n(x) = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} = \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!}$$

2. $f(x) = \sin x$

$$f(0) = 0, \quad f'(0) = \cos 0 = 1, \quad f''(0) = -\sin 0 = 0, \quad f'''(0) = -\cos 0 = -1, \quad f^{(4)}(0) = \sin 0 = 0, \dots,$$

$$f^{(2n-1)}(0) = (-1)^{n-1}, \quad f^{(2n)}(0) = 0$$

$$T_{2n-1}(x) = T_{2n}(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^{2n-1}}{(2n-1)!} = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{x^{2k-1}}{(2k-1)!}$$

3. $f(x) = \cos x$
 $f(0) = 1, f'(0) = -\sin 0 = 0, f''(0) = -\cos 0 = -1, f'''(0) = \sin 0 = 0, f^{(4)}(0) = \cos 0 = 1, \dots,$
 $f^{(2n)}(0) = (-1)^n, f^{(2n+1)}(0) = 0$
 $T_{2n}(x) = T_{2n+1}(x) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!}$
4. $f(x) = \ln(1+x)$
 $f(0) = 0,$
Podle 2.4.2.4 je $f^{(k)}(x) = (-1)^{k-1} \frac{(k-1)!}{(1+x)^k}$, a tedy $f^{(k)}(0) = (-1)^{k-1} (k-1)!$.
 $T_n(x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n} = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{x^k}{k}$
5. $f(x) = (1+x)^\alpha, \alpha \in \mathbb{R}$
 $f(0) = 1,$
Podle 2.4.2.1 je $[(1+x)^\alpha]^{(k)} = \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-k+1)(1+x)^{\alpha-k}$, a tedy
 $f^{(k)}(0) = \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-k+1).$
Definujme $\binom{\alpha}{k} = \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\dots(\alpha-k+1)}{k!}$. Pak
 $T_n(x) = 1 + \binom{\alpha}{1}x + \binom{\alpha}{2}x^2 + \binom{\alpha}{3}x^3 + \dots + \binom{\alpha}{n}x^n = \sum_{k=0}^n \binom{\alpha}{k}x^k.$
Pro $\alpha \in \mathbb{N}, \alpha \leq n$ je Maclaurinův polynom rozepsáním výrazu $(1+x)^\alpha$ podle binomické věty.

2.6.8 Věta (Brook Taylor [1685 – 1731])

Buď f funkce, $a \in \text{Dom } f, n \in \mathbb{N}$. Nechť existuje okolí $\mathcal{O}(a)$ bodu a takové, že funkce f má $(n+1)$ -tou derivaci v každém bodě z $\mathcal{O}(a)$. Buď $x \in \mathcal{O}(a)$. Pak v otevřeném intervalu s krajními body a a x existuje číslo c takové, že platí

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}.$$

D.: Buď $x_0 > a, x_0 \in \mathcal{O}(a)$ libovolné.

Položíme $K = \frac{f(x_0) - T_n(x_0)}{(x_0 - a)^{n+1}}$, neboli $f(x_0) = T_n(x_0) + K(x_0 - a)^{n+1}$.

Dále položíme $F(x) = f(x) - T_n(x) - K(x-a)^{n+1}$ pro $x \in [a, x_0]$.

Funkce F má podle 2.3.3 a 2.3.5 na $[a, x_0]$ spojitě derivace až do n -té, neboť f má na tomto intervalu $(n+1)$ -tou derivaci a $T_n(x), (x-a)^{n+1}$ mají derivace všech řádů.

Podle 2.6.5 platí $F(a) = F'(a) = F''(a) = \dots = F^{(n)}(a) = 0$.

Dále $F(x_0) = 0$. Tedy F splňuje na $[a, x_0]$ předpoklady 2.5.1. odtud plyne, že existuje $c_1 \in (a, x_0)$ že $F'(c_1) = 0$.

To dále znamená, že funkce F' splňuje na $[a, c_1]$ předpoklady 2.5.1, z čehož plyne, že existuje $c_2 \in (a, c_1)$ že $F''(c_2) = 0$.

Tak pokračujeme dále. Nakonec ukážeme, že existuje $c_n, a < c_n < x_0$ takové, že $F^{(n)}(c) = 0$.

Celkem tedy dostaneme, že funkce $F^{(n)}$ splňuje na $[a, c_n]$ předpoklady 2.5.1, z čehož plyne, že existuje $c \in (a, c_n) \subseteq (a, x_0)$ že $F^{(n+1)}(c) = 0$.

Přítom $F^{(n+1)}(c) = f^{(n+1)}(c) - 0 - K(n+1)!$, z čehož plyne $K = \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}$.

Dokázali jsme tedy platnost vzorce pro $x = x_0 > a, x_0 \in \mathcal{O}(a)$. Poněvadž $x_0 > a$ byl libovolný, platí vzorec na pravém okolí bodu a .

Jeho platnost na levém okolí bodu a dokážeme analogicky. \square

Poznámky

- Vzorec uvedený ve větě lze zapsat: $f(x) = T_n(x) + R_n(x)$. Tento vzorec se nazývá *Taylorův* (pro $a = 0$ *Maclaurinův*); výraz $R_n(x)$ se nazývá *zbytek v Taylorově vzorci* nebo *Taylorův zbytek*.

Výraz $R_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}$ se nazývá *Lagrangeův tvar (Taylorova) zbytku*.

Existují i jiné tvary zbytku, vždy však platí $R_n(x) = o((x-a)^n)$, $x \rightarrow a$.

- Číslo c lze napsat ve tvaru $c = a + \Theta(x-a)$, kde $\Theta \in (0, 1)$.
- Je vidět, že Lagrangeova věta 2.5.3 je speciálním případem věty Taylorovy (pro $n = 1$). Naopak, Taylorova věta byla dokázána jako důsledek věty Rolleovy 2.5.1

2.6.9 Příklad (Zbytky Maclaurinových polynomů některých elementárních funkcí)

Sr. 2.4.2

1. $f(x) = e^x$, $R_n(x) = \frac{e^{\Theta x}}{(n+1)!}x^{n+1}$
2. $f(x) = \sin x$, $R_{2n-1}(x) = \frac{\sin(\Theta x + n\pi)}{(2n)!}x^{2n}$
3. $f(x) = \cos x$, $R_{2n}(x) = \frac{\cos(\Theta x + \frac{2n+1}{2}\pi)}{(2n+1)!}x^{2n+1}$
4. $f(x) = \ln(x+1)$, $R_n(x) = (-1)^n \frac{x^{n+1}}{(n+1)(1+\Theta x)^{n+1}}$
5. $f(x) = (1+x)^\alpha$, $R_n(x) = \binom{\alpha}{n+1} (1+\Theta x)^{\alpha-n-1} x^{n+1}$

Taylorova věta slouží k přibližnému výpočtu funkčních hodnot

2.6.10 Příklad

Najděte Maclaurinův polynom, který na intervalu $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ aproximuje funkci $f(x) = \sin x$ s přesností 10^{-5} .

Ř.:

$$\sin x = T_{2n-1}(x) + R_{2n-1}(x) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{x^{2k-1}}{(2k-1)!} + \frac{\sin(\Theta x + n\pi)}{(2n)!} x^{2n}$$

$$|R_{2n-1}(x)| = \left| \frac{\sin(\Theta x + n\pi)}{(2n)!} x^{2n} \right| \leq \frac{|x^{2n}|}{(2n)!} \leq \frac{(\frac{\pi}{2})^{2n}}{(2n)!}$$

Snadno ověříme, že $|R_9(x)| \leq 0.00002$ a $|R_{11}| \leq 0.0000005 < 10^{-5}$. Tedy stačí vzít

$$T_{11}(x) = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \frac{x^7}{5040} + \frac{x^9}{362880} - \frac{x^{11}}{39916800}.$$

□

2.7 Průběh funkce

2.7.1 Věta

Nechť funkce f má v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ vlastní nebo nevlastní derivaci. Je-li $f'(x) > 0$ (resp. $f'(x) < 0$), pak je f v bodě x_0 rostoucí (resp. klesající).

D.: Nechť $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > 0$. Pak existuje $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > 0$ pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0)$.

Je-li $x \in \mathcal{O}(x_0)$, $x < x_0$, pak $x - x_0 < 0$ a tedy $f(x) - f(x_0) < 0$, tj. $f(x) < f(x_0)$.

Je-li $x \in \mathcal{O}(x_0)$, $x > x_0$, pak $x - x_0 > 0$ a tedy $f(x) - f(x_0) > 0$, tj. $f(x) > f(x_0)$.

Druhé tvrzení dokážeme analogicky. □

2.7.2 Věta

Nechť funkce f je spojitá na intervalu J a má zde vlastní nebo nevlastní derivaci. f je rostoucí (resp. klesající) na J právě tehdy, když $f'(x) \geq 0$ (resp. $f'(x) \leq 0$) na J , přičemž rovnost $f'(x) = 0$ neplatí na žádném subintervalu intervalu J .

D.: \Rightarrow : Nechť f je rostoucí na J , $x_0 \in J$ libovolný. Pro $x \in J$, $x > x_0$ je $f(x) > f(x_0)$ a pro $x \in J$, $x < x_0$ je $f(x) < f(x_0)$, tedy $\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} > 0$ pro $x \in J$. Odtud plyne, že $f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \geq 0$.
Kdyby rovnost $f'(x_0) = 0$ platila na intervalu $I \subseteq J$, byla by podle 2.5.4.2 funkce f konstantní na I .

\Leftarrow : Budte $x_1, x_2 \in J$, $x_1 < x_2$. Na $[x_1, x_2]$ funkce f splňuje předpoklady 2.5.3 a tedy existuje $\xi \in (x_1, x_2)$ takové, že $\frac{f(x_1) - f(x_2)}{x_1 - x_2} = f'(\xi) \geq 0$, což znamená, že $f(x_1) \leq f(x_2)$.
 f je tedy neklesající na J a poněvadž na žádném subintervalu není konstantní, je rostoucí.

Druhé tvrzení se dokáže analogicky. \square

2.7.3 Definice

Řekneme, že funkce f má v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ *lokální maximum* (resp. *minimum*), jestliže existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ bodu x_0 takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x_0) \cap \text{Dom } f$ bodu x_0 platí $f(x) \leq f(x_0)$ (resp. $f(x) \geq f(x_0)$).

Lokální maximum (resp. minimum) se nazývá *ostré*, jestliže existuje ryzí okolí $\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že pro každé $x \in (\mathcal{O}(x_0) \setminus \{x_0\}) \cap \text{Dom } f$ platí $f(x) < f(x_0)$ (resp. $f(x) > f(x_0)$).

Lokální maxima a minima souhrnně nazýváme *lokální extrém*y, případně *ostré lokální extrém*y.

Řekneme, že funkce f má v bodě $x_0 \in M \subseteq \text{Dom } f$ *absolutní maximum* (resp. *minimum*), na množině M , jestliže pro každé $x \in M$ platí $f(x) \leq f(x_0)$ (resp. $f(x) \geq f(x_0)$).

Absolutní maximum (resp. minimum) se nazývá *ostré*, jestliže příslušné nerovnosti jsou ostré.

Absolutní maxima a minima souhrnně nazýváme *absolutní extrém*y.

2.7.4 Poznámky

- Má-li funkce v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ lokální extrém a existuje-li vlastní nebo nevlastní $f'(x_0)$, pak $f'(x_0) = 0$. (Plyne bezprostředně z 2.7.1.)
- Body, v nichž $f'(x_0) = 0$ nazýváme *stacionární body* funkce f .
Bezprostředně z předchozího tvrzení vyplývá, že funkce může mít lokální extrém buď ve stacionárním bodě a nebo v bodě, kde neexistuje vlastní ani nevlastní derivace.
- Stacionární bod nemusí být bodem lokálního extrému.
Např. $f(x) = x^3$, $f'(0) = 0$, $f'(x) = 3x^2 > 0$ pro $x \neq 0$. Tedy podle 2.7.2 je f rostoucí na \mathbb{R} .

2.7.5 Věta

Nechť funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$. Existuje-li levé ryzí okolí $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 , v němž je f neklesající (resp. nerostoucí) a pravé ryzí okolí $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 , v němž je f nerostoucí (resp. neklesající), pak má funkce f v bodě x_0 lokální maximum (resp. lokální minimum).

Existuje-li levé ryzí okolí $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 , v němž je f rostoucí (resp. klesající) a pravé ryzí okolí $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 , v němž je f klesající (resp. rostoucí), pak má funkce f v bodě x_0 ostré lokální maximum (resp. ostré lokální minimum).

D.: Nechť f je v $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ neklesající a v $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ nerostoucí. Podle 2.1.15 je $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}\}$, $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}\}$. Poněvadž f je spojitá v x_0 , je $f(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \sup\{f(x) : x \in (\mathcal{P}(x_0) \cup \mathcal{L}(x_0)) \setminus \{x_0\}\}$.

Nechť f je v $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ rostoucí a v $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ klesající. Buď $x \in \mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ libovolný. Pro $x_1 \in (x, x_0) \subseteq \mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $f(x) < f(x_1) \leq f(x_0) = \sup\{f(x) : x \in \mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}\}$.

Podobně ukážeme, že pro $x \in \mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ je $f(x_0) > f(x)$.

Analogicky ukážeme platnost tvrzení v ostatních případech. \square

Obrácená věta neplatí. Má-li funkce f v bodě x_0 lokální extrém, nemusí být v žádném ryzím jednostranném okolí monotonní.

Předpoklad o spojitosti funkce f je podstatný.

2.7.6 Důsledky

1. Nechť funkce f je spojitá v bodě $x_0 \in \text{Dom } f$ a existuje levé ryzí okolí $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 a pravé ryzí okolí $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 taková, že funkce f má vlastní nebo nevlastní derivaci $f'(x)$ na $(\mathcal{P}(x_0) \cup \mathcal{L}(x_0)) \setminus \{x_0\}$, přičemž $f'(x) > 0$ (resp. $f'(x) < 0$) na $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ a $f'(x) < 0$ (resp. $f'(x) > 0$) na $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$. Pak má f v bodě x_0 ostré lokální maximum (resp. minimum).

D.: plyne z 2.7.5 a z 2.7.1 \square

2. Nechť $f'(x_0) = 0$ a nechť funkce f má v bodě x_0 vlastní nebo nevlastní druhou derivaci. Je-li $f''(x_0) < 0$, má f v bodě x_0 ostré lokální maximum, je-li $f''(x_0) > 0$, má f v bodě x_0 ostré lokální minimum.

D.: Je-li $f''(x_0) < 0$, je $f'(x_0)$ v bodě x_0 podle 2.7.1 klesající. Existuje tedy ryzí levé okolí $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že $f'(x) > 0$ na $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ a existuje ryzí pravé okolí $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 takové, že $f'(x) < 0$ na $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$.

Analogicky ukážeme platnost druhého tvrzení. \square

2.7.7 Poznámka o absolutních extrémech

Nechť funkce f je spojitá na $[a, b]$. Podle 2.2.12 nabývá f na $[a, b]$ své největší i nejmenší hodnoty, tedy svého absolutního maxima a absolutního minima. Absolutních extrémů nabývá buď v bodech lokálních extrémů nebo v krajních bodech intervalu $[a, b]$.

2.7.8 Definice

Řekneme, že funkce f je *konvexní* (resp. *konkávní*) na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$, jestliže pro každé tři body $x_1, x_2, x_3 \in J$, $x_1 < x_2 < x_3$ platí $f(x_2) \leq f(x_1) + \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1}(x_2 - x_1)$

(resp. $f(x_2) \geq f(x_1) + \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1}(x_2 - x_1)$).

Řekneme, že funkce f je *ryze konvexní* (resp. *ryze konkávní*) na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$, jestliže pro každé tři body $x_1, x_2, x_3 \in J$, $x_1 < x_2 < x_3$ platí $f(x_2) < f(x_1) + \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1}(x_2 - x_1)$

(resp. $f(x_2) > f(x_1) + \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1}(x_2 - x_1)$).

2.7.9 Věta

Funkce f je konvexní na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$ právě tehdy, když pro každé tři body $x_1, x_2, x_3 \in J$, $x_1 < x_2 < x_3$ je splněna některá z ekvivalentních podmínek

$$(\vee_1) \quad \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1},$$

$$(\vee_2) \quad \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2},$$

$$(\vee_3) \quad \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

Nerovnost v těchto podmínkách je ostrá právě tehdy, když funkce f je ryze konvexní na intervalu J .

Funkce f je konkávní na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$ právě tehdy, když pro každé tři body $x_1, x_2, x_3 \in J$, $x_1 < x_2 < x_3$ je splněna některá z ekvivalentních podmínek

$$(\wedge_1) \quad \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1},$$

$$(\wedge_2) \quad \frac{f(x_3) - f(x_1)}{x_3 - x_1} \geq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2},$$

$$(\wedge_3) \quad \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}.$$

Nerovnost v těchto podmínkách je ostrá právě tehdy, když funkce f je ryze konkávní na intervalu J .

D.: Podmínka (\vee_1) je zřejmě ekvivalentní s podmínkou v definici 2.7.8.

Upravíme podmínku (\vee_1) :

$$\begin{aligned} (x_3 - x_1)(f(x_2) - f(x_1)) &\leq (x_2 - x_1)(f(x_3) - f(x_1)) \\ x_3f(x_2) - x_3f(x_1) - x_1f(x_2) + x_1f(x_1) &\leq x_2f(x_3) - x_2f(x_1) - x_1f(x_3) + x_1f(x_1) \\ x_2f(x_1) + x_3f(x_2) + x_1f(x_3) &\leq x_1f(x_2) + x_2f(x_3) + x_3f(x_1) \end{aligned}$$

Dále upravíme podmínku (\vee_2) :

$$\begin{aligned} (x_3 - x_2)(f(x_3) - f(x_1)) &\leq (x_3 - x_1)(f(x_3) - f(x_2)) \\ x_3f(x_3) - x_3f(x_1) - x_2f(x_3) + x_2f(x_1) &\leq x_3f(x_3) - x_3f(x_2) - x_1f(x_3) + x_1f(x_2) \\ x_2f(x_1) + x_3f(x_2) + x_1f(x_3) &\leq x_1f(x_2) + x_2f(x_3) + x_3f(x_1) \end{aligned}$$

Odtud je vidět, že podmínky (\vee_1) a (\vee_2) jsou ekvivalentní. Stejně (prostým roznásobením) ukážeme ekvivalenci podmínky (\vee_3) s podmínkami (\vee_1) a (\vee_2) .

Tvrzení pro konkávní funkce dokážeme analogicky. \square

2.7.10 Věta

Nechť funkce f má na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$ derivaci f' . Je-li funkce f konvexní (resp. konkávní) na J , pak pro každé dva různé vnitřní body $x, x_0 \in J$ platí $f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ (resp. $f(x) \leq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$). Je-li funkce f ryze konvexní (resp. ryze konkávní) na J , pak pro každé dva různé vnitřní body $x, x_0 \in J$ platí $f(x) > f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$ (resp. $f(x) < f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$).

D.:

- Buď f konvexní funkce na J a x, x_0 libovolné vnitřní body intervalu J .

Nechť nejprve $x_0 < x$. Podle (\vee_1) pro libovolné $\xi \in (x_0, x)$ platí $\frac{f(\xi) - f(x_0)}{\xi - x_0} \leq \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$.

Limitním přechodem $\xi \rightarrow x_0$ dostaneme $f'(x_0) \leq \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$, neboli $f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \leq f(x)$.

Nechť nyní $x < x_0$. Podle (\vee_2) pro libovolné $\xi \in (x, x_0)$ platí $\frac{f(x_0) - f(x)}{x_0 - x} \leq \frac{f(x_0) - f(\xi)}{x_0 - \xi}$.

Limitním přechodem $\xi \rightarrow x_0$ dostaneme $\frac{f(x_0) - f(x)}{x_0 - x} \leq f'(x_0)$, neboli $f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$.

- Je-li f ryze konvexní na J , pak podle již dokázaného pro každé dva vnitřní body $x, x_0 \in J$ platí $f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$. Pripusťme, že existují vnitřní body $x_1, x_3 \in J$, $x_1 < x_3$ takové, že $f(x_3) = f(x_1) + f'(x_1)(x_3 - x_1)$.

Podle (\vee_1) — s modifikací pro ryze konvexní funkce — pro každé $x_2 \in (x_1, x_3)$ platí

$$\begin{aligned} \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} &< \frac{f(x_1) + f'(x_1)(x_3 - x_1) - f(x_1)}{x_3 - x_1} \\ \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} &< f'(x_1) \\ f(x_2) &< f(x_1) + f'(x_1)(x_2 - x_1), \end{aligned}$$

což je spor s již dokázaným (při označení $x = x_2$, $x_0 = x_1$).

Analogicky s využitím (\vee_2) vyloučíme možnost existence vnitřních bodů $x_1, x_3 \in J$ takových, že $f(x_1) = f(x_3) + f'(x_3)(x_1 - x_3)$.

Tedy pro všechny vnitřní body $x, x_0 \in J$ platí $f(x) > f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$.

- Tvrzení o konkávní funkci dokážeme analogicky.

\square

2.7.11 Věta

Nechť funkce f má na intervalu $J \subseteq \text{Dom } f$ derivaci f' . Funkce f je ryze konvexní (resp. konkávní) na intervalu J právě tehdy, když f' je na J rostoucí (resp. klesající).

D.: \Rightarrow : Budte $x_1, x_2 \in J$, $x_1 < x_2$ libovolné. Podle 2.7.10 je $f(x_2) > f(x_1) + f'(x_1)(x_2 - x_1)$ a $f(x_1) > f(x_2) + f'(x_2)(x_1 - x_2)$, neboli $\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} > f'(x_1)$ a $\frac{f(x_1) - f(x_2)}{x_1 - x_2} < f'(x_2)$. Odtud $f'(x_1) < f'(x_2)$.

\Leftarrow : Sporem. Nechť f' je rostoucí na J a připustíme, že f není ryze konvexní, tedy že existují $x_1, x_2, x_3 \in J$, $x_1 < x_2 < x_3$ takové, že $\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \geq \frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2}$ (sr. (\vee_3)).

Podle 2.5.3 existují $\xi_1 \in (x_1, x_2)$ a $\xi_2 \in (x_2, x_3)$, že $\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(\xi_1)$ a $\frac{f(x_3) - f(x_2)}{x_3 - x_2} = f'(\xi_2)$.

Zřejmě $\xi_1 < \xi_2$ a poněvadž f' je rostoucí, je $f'(\xi_1) < f'(\xi_2)$, což je spor.

Tvrzení o konkávní funkci dokážeme analogicky. \square

Odtud a z 2.7.2 plyne

2.7.12 Důsledek

Nechť funkce f má na intervalu J spojitou první derivaci a vlastní nebo nevlastní druhou derivaci. f je ryze konvexní (resp. konkávní) na J právě tehdy, když $f''(x) \geq 0$ (resp. $f''(x) \leq 0$) na J , přičemž rovnost $f''(x) = 0$ neplatí na žádném subintervalu intervalu J .

2.7.13 Definice

Nechť f je funkce spojitá v $x_0 \in \text{Dom } f$ a nechť existuje vlastní nebo nevlastní derivace $f'(x_0)$. Řekneme, že x_0 je *inflexním bodem* funkce f , jestliže existuje levé ryzí okolí $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 a pravé ryzí okolí $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ bodu x_0 taková, že f je ryze konvexní na $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$ a ryze konkávní na $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$, nebo naopak f je ryze konvexní na $\mathcal{P}(x_0) \setminus \{x_0\}$ a ryze konkávní na $\mathcal{L}(x_0) \setminus \{x_0\}$.

2.7.14 Poznámky

1. Je-li x_0 inflexní bod funkce f a f' je spojitá v bodě x_0 . Pak f' má v bodě x_0 ostrý lokální extrém. (sr. 2.7.6.1, a 2.7.12).
2. Je-li x_0 inflexní bod funkce f a existuje vlastní nebo nevlastní druhá derivace $f''(x_0)$, pak $f''(x_0) = 0$. Opačné tvrzení neplatí. Z $f''(x_0) = 0$ neplyne, že by x_0 byl inflexní bod funkce f .
Například: $f(x) = x^4$, $f''(x) = 12x^2$, $f''(0) = 0$ a v bodě $x_0 = 0$ není inflexní bod funkce f .

2.7.15 Definice

Řekneme, že přímka $p : x = x_0$ je *asymptotou bez směrnice* funkce f , jestliže funkce f má v x_0 alespoň jednu nevlastní jednostrannou limitu.

Řekneme, že přímka $p : y = ax + b$ je *asymptotou se směrnicí* funkce f , jestliže funkce f je definována v okolí ∞ (resp. $-\infty$) a platí $\lim_{x \rightarrow \infty} (ax + b - f(x)) = 0$ (resp. $\lim_{x \rightarrow -\infty} (ax + b - f(x)) = 0$).

Libovolná funkce může mít nejvýše dvě asymptoty se směrnicí, může však mít libovolný počet asymptot bez směrnice.

2.7.16 Věta

Přímka $y = ax + b$ je asymptotou se směrnici funkce f právě tehdy, když $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = a$, $\lim_{x \rightarrow \infty} (f(x) - ax) = b$
 $\left(\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = a, \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - ax) = b \right)$.

D.: \Rightarrow : Pokud $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (ax + b - f(x)) = 0$ pak podle 2.1.7.7 a 2.1.7.4 také $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{ax + b - f(x)}{x} = 0$, tedy

$$0 = a - \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x}, \text{ neboli } \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = a.$$

Dále z $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (ax + b - f(x)) = 0$ plyne $0 = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (ax - f(x)) + b$ a tedy $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - ax) = b$.

\Leftarrow : Jestliže $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - ax) = b$, pak $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} (ax + b - f(x)) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (ax - f(x)) + b = -b + b = 0$. \square

2.7.17 Postup při vyšetřování průběhu funkce

1. Určíme Dom f ; pokud je to možné, tak nulové body funkce f a intervaly, na nichž je f kladná a záporná.
2. Vypočítáme f' ; určíme nulové body f' (stacionární body); body, v nichž f' není definována; body, v nichž f' je kladná a záporná (Tj. určíme intervaly monotonnosti a lokální extrémy.)
3. Vypočítáme f'' ; určíme nulové body f'' ; body, v nichž f'' není definována; body, v nichž f'' je kladná a záporná (Tj. určíme intervaly konvexity a konkavity, inflexní body.)
4. Vypočítáme příslušné jednostranné limity v „hraničních bodech“ Dom f (Tj. najdeme všechny asymptoty bez směrnice). Najdeme obě asymptoty se směrnici (pokud existují).
5. Vypočítáme funkční hodnoty ve význačných bodech (stacionárních, inflexních), případně v několika dalších bodech. V inflexních bodech může být užitečné vypočítat hodnotu derivace.

2.8 Cvičení

Vypočítejte derivaci funkce

$$1) f(x) = (\sqrt{x} + 1) \left(\frac{1}{\sqrt{x}} - 1 \right),$$

$$2) f(x) = \sqrt{x\sqrt{x\sqrt{x}}},$$

$$3) f(x) = \frac{1 + x - x^2}{1 - x + x^2},$$

$$4) f(x) = \sqrt{\sin x},$$

$$5) f(x) = xe^x(\cos x + \sin x),$$

$$6) f(x) = \sqrt{\frac{1 - e^x}{1 + e^x}},$$

$$7) f(x) = x^2 \log_3 x,$$

$$8) f(x) = \text{tg}(\sin x),$$

$$9) f(x) = \ln \sqrt{\frac{1 - \sin x}{1 + \sin x}},$$

$$10) f(x) = x \arcsin \sqrt{\frac{x}{x+1}} + \arctg \sqrt{x - \sqrt{x}},$$

$$11) f(x) = \ln \frac{\sqrt{1+x} - \sqrt{1-x}}{\sqrt{1+x} + \sqrt{1-x}} + 2 \arctg \sqrt{\frac{1-x}{1+x}},$$

$$12) f(x) = 3^{\sin^2 x},$$

$$13) f(x) = x^{x^x},$$

$$14) f(x) = \frac{1}{2} \arctg \sqrt[4]{1+x^4} + \frac{1}{4} \ln \frac{\sqrt[4]{1+x^4} + 1}{\sqrt[4]{1+x^4} - 1}.$$

Najděte rovnici tečny a normály ke grafu funkce

$$15) y = \frac{8}{4+x^2} \text{ v bodě } (2, ?), \quad 16) y = x^2 \text{ v bodě } (x_0, ?).$$

17) Úhlem křivek rozumíme úhel tečen těchto křivek ve společném bodě. Určete úhel grafu funkce $y = x^2$ a křivky $x^2 + y^2 = 1$.

18) Na grafu funkce $y = x^3$ najděte bod, v němž je tečna rovnoběžná se sečnou spojující body $(-1, ?)$ a $(?, 8)$.

Vypočítejte limity

$$\begin{array}{ll}
19) \lim_{x \rightarrow \frac{\pi}{4}} \frac{\operatorname{tg} x - 1}{\sin 4x}, & 20) \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln x}{\ln \sin x}, \\
21) \lim_{x \rightarrow \infty} x \sin \frac{a}{x}, & 22) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{e^x - 1} \right), \\
23) \lim_{x \rightarrow 0^+} x^{x^x - 1}, & 24) \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^x - x}{\ln x - x + 1}, \\
25) \lim_{x \rightarrow \infty} (\sqrt[6]{x^6 + x^5} - \sqrt[6]{x^6 - x^5}), & 26) \lim_{x \rightarrow \infty} \left(x - x^2 \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right) \right).
\end{array}$$

Najděte Maclaurinův polynom stupně n dané funkce

$$27) f(x) = \frac{x^2 + x + 1}{x^2 - x + 1}, \quad n = 4, \quad 28) f(x) = \sqrt{1 - 2x + x^3} - \sqrt[3]{1 - 3x + x^3}, \quad n = 3,$$

$$29) f(x) = \sqrt[3]{\sin x^3}, \quad n = 7, \quad 30) f(x) = \operatorname{tg} x, \quad n = 5.$$

Vyšetřete průběh funkce

$$31) f(x) = \frac{x}{\sqrt[3]{x^2 - 1}}, \quad 32) f(x) = \frac{x^3}{2(x + 1)^2}, \quad 33) f(x) = xe^{-\frac{x^2}{2}}, \quad 34) f(x) = \sqrt[3]{1 - x^3}.$$

35) Najděte nejmenší a největší hodnotu součinu m -té a n -té mocniny kladných čísel, jejichž součet je a .

36) Jaký největší povrch může mít válec vepsaný kouli o poloměru R ?

37) Jaký nejmenší objem může mít kužel opsaný kouli o poloměru R ?

38) Na elipse $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ najděte v prvním kvadrantu bod takový, že tečna k elipse vedená tímto bodem vytvoří se souřadnými osami trojúhelník nejmenšího obsahu.

39) Jakou výšeč je třeba vyříznout z kruhu o poloměru R , aby zbývající část bylo možno svinout do kornoutu o maximálním objemu?

Výsledek: 1) $-\frac{x+1}{2x} \sqrt[3]{x^2}$ 2) $\frac{7}{8\sqrt[8]{x}}$ 3) $\frac{2-4x}{(1+x-x^2)^2}$ 4) $\frac{\sqrt{\cos x \cotg x}}{2}$ 5) $e^x(\sin x + (2x + 1) \cos x)$ 6) $-\frac{e^x}{(1+e^x)\sqrt{1-e^{2x}}}$
7) $x \log_3 e x^2$ 8) $\frac{\cos x}{(\sin \sin x)^2}$ 9) $-\frac{1}{\cos x}$ 10) $\arcsin \sqrt{\frac{x}{x+1}}$ 11) $\frac{\sqrt{1-x^2}}{2x(1+x)}$ 12) $3^{\sin^2 x} \sin 2x \ln 3$ 13) $(2 \ln x + 1)x^{x^x+1}$ 14) $-\frac{1}{x \sqrt[4]{(1+x^4)^3}}$ 15) $x + 2y - 4 = 0, 2x - y - 1 = 0$ 16) $2x_0x - y - x_0^2 = 0, x + 2x_0y - x_0 - 2x_0^3 = 0$ 17) asi $70^\circ 37' 46''$
18) $(-1, -1), (1, 1)$ 19) $-\frac{1}{2}$ 20) 1 21) a 22) $\frac{1}{2}$ 23) 1 24) -2 25) $\frac{1}{3}$ 26) $\frac{1}{2}$ 27) $1 + 2x + 2x^2 - 2x^4$ 28) $\frac{1}{2}x^2 - \frac{4}{3}x^3$
29) $x - \frac{1}{18}x^7$ 30) $x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5$ 31) $\operatorname{Dom} f = \mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$; lichá; nulový bod 0; rostoucí $(-\infty, -\sqrt{3}]$, $[\sqrt{3}, \infty)$; klesající $[-\sqrt{3}, -1)$, $(-1, 1)$, $(1, \sqrt{3}]$; lokální minimum $f(\sqrt{3}) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt[3]{2}}$; lokální maximum $f(-\sqrt{3}) = -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt[3]{2}}$; konvexní $(-\infty, -3)$, $(-1, 0]$, $(1, 3]$; konkávní $[-3, -1)$, $[0, 1)$, $[3, \infty)$; inflexní body $f(3) = \frac{3}{2}$, $f(-3) = -\frac{3}{2}$; asymptoty $x = 1$, $x = -1$ 32) $\operatorname{Dom} f = \mathbb{R} \setminus \{-1\}$; nulový bod 0; rostoucí $(-\infty, -3]$, $(-1, \infty)$; klesající $[-3, -1)$; lokální maximum $f(-3) = -\frac{27}{8}$; konvexní $[0, \infty)$; konkávní $(-\infty, -1)$, $(-1, 0]$; inflexní bod $f(0) = 0$; asymptoty $x = -1$, $x - 2y - 2 = 0$ 33) $\operatorname{Dom} f = \mathbb{R}$; lichá; nulový bod 0; rostoucí $[-1, 1]$; klesající $(-\infty, -1]$, $[1, \infty)$; lokální minimum $f(-1) = -\frac{1}{\sqrt{e}}$; lokální maximum $f(1) = \frac{1}{\sqrt{e}}$; konvexní $[-\sqrt{3}, 0]$, $[\sqrt{3}, \infty)$; konkávní $(-\infty, -\sqrt{3}]$, $[0, \sqrt{3}]$; inflexní body $f(-\sqrt{3}) = -\sqrt{\frac{3}{e^3}}$, $f(0) = 0$, $f(\sqrt{3}) = \sqrt{\frac{3}{e^3}}$; asymptota $y = 0$ 34) $\operatorname{Dom} f = \mathbb{R}$; nulový bod 1; klesající $(-\infty, \infty)$; konvexní $(-\infty, 0]$, $[1, \infty)$; konkávní $[0, 1]$; inflexní body $f(0) = 1$, $f(1) = 0$; asymptota $y = -x$ 35) největší hodnota $\left(\frac{a}{m+n}\right)^{m+n} m^m n^n$, nejmenší hodnota není 36) $\pi R^2(1 + \sqrt{5})$ 37) $\frac{8}{3}\pi R^3$ 38) $\left(\frac{a}{\sqrt{2}}, \frac{b}{\sqrt{2}}\right)$, $P_{\min} = ab$
39) vyříznout úhel $2\pi \left(1 - \sqrt{\frac{2}{3}}\right)$, $V_{\max} = \frac{2\sqrt{3}}{27}\pi R^3$

2.9 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definici x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 3

Doplněk

3.1 Diferenční a sumační počet

3.1.1 Definice

Buď $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost. Posloupnost $\{\Delta a_n\}_{n=1}^{\infty}$ jejíž členy jsou dány vztahem $\Delta a_n = a_{n+1} - a_n$ nazýváme (*první*) *diference (vpřed)* posloupnosti $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$.

Zřejmě platí: Posloupnost $\{a_n\}$ je rostoucí (klesající) právě tehdy, když všechny členy posloupnosti $\{\Delta a_n\}$ jsou kladné (záporné).

3.1.2 Definice

Řekneme, že $k \in \mathbb{N}$ je *uzel posloupnosti* $\{a_n\}$, jestliže $a_k = 0$ nebo $a_k a_{k-1} < 0$.

3.1.3 Věta

Buď $\{a_n\}$ posloupnost, $k \in \mathbb{N}$. Jestliže $a_k > a_{k-1}$ a $a_k \geq a_{k+1}$, pak k je uzel posloupnosti $\{\Delta a_n\}$; jestliže $a_k < a_{k-1}$ a $a_k \leq a_{k+1}$, pak k je uzel posloupnosti $\{\Delta a_n\}$.

D.: Nechtě $a_k > a_{k-1}$, $a_k > a_{k+1}$. Pak $\Delta a_k = a_{k+1} - a_k < 0$, $\Delta a_{k-1} = a_k - a_{k-1} > 0$, tedy $(\Delta a_k)(\Delta a_{k-1}) < 0$.

Nechtě $a_k > a_{k-1}$, $a_k = a_{k+1}$. Pak $\Delta a_k = a_{k+1} - a_k = 0$.

Analogicky lze ukázat platnost druhého tvrzení. \square

3.1.4 Věta

Buďte $\{a_n\}, \{b_n\}$ posloupnosti, $c \in \mathbb{R}$. Pak platí

1. $\Delta(ca_n) = c\Delta a_n$,
2. $\Delta(a_n + b_n) = \Delta a_n + \Delta b_n$,
3. $\Delta(a_n - b_n) = \Delta a_n - \Delta b_n$,
4. $\Delta(a_n b_n) = (\Delta a_n)b_{n+1} + a_n(\Delta b_n) = (\Delta a_n)b_n + a_{n+1}(\Delta b_n)$,
5. Pokud $b_n b_{n+1} \neq 0$, pak $\Delta\left(\frac{a_n}{b_n}\right) = \frac{(\Delta a_n)b_n - a_n(\Delta b_n)}{b_n b_{n+1}}$.

D.:

1. $\Delta(ca_n) = ca_{n+1} - ca_n = c(a_{n+1} - a_n) = c\Delta a_n$.
2. $\Delta(a_n + b_n) = (a_{n+1} + b_{n+1}) - (a_n + b_n) = (a_{n+1} - a_n) + (b_{n+1} - b_n) = \Delta a_n + \Delta b_n$.
3. Plyne z 1. a 2.

4. Platí

$$\begin{aligned}\Delta(a_n b_n) &= a_{n+1} b_{n+1} - a_n b_n = a_{n+1} b_{n+1} - a_n b_{n+1} + a_n b_{n+1} - a_n b_n = \\ &= (a_{n+1} - a_n) b_{n+1} + a_n (b_{n+1} - b_n) = (\Delta a_n) b_{n+1} + a_n (\Delta b_n),\end{aligned}$$

takže první vztah platí. Druhý plyne z prvního a z komutativity násobení.

$$5. \Delta\left(\frac{1}{b_n}\right) = \frac{1}{b_{n+1}} - \frac{1}{b_n} = \frac{b_n - b_{n+1}}{b_n b_{n+1}} = -\frac{\Delta b_n}{b_n b_{n+1}}.$$

$$\text{Podle 4. nyní je } \Delta\left(\frac{a_n}{b_n}\right) = \frac{\Delta a_n}{b_{n+1}} + a_n \Delta\left(\frac{1}{b_n}\right) = \frac{\Delta a_n}{b_{n+1}} - a_n \frac{\Delta b_n}{b_n b_{n+1}} = \frac{(\Delta a_n) b_n - a_n (\Delta b_n)}{b_n b_{n+1}}.$$

□

3.1.5 Definice

Buďte $\{a_n\}$ posloupnost, $m, k \in \mathbb{N}$, $m \leq k$. Sumu členů posloupnosti $\{a_n\}$ v mezích od m do k definujeme vztahem

$$\sum_{i=m}^k a_i = a_m + a_{m+1} + \cdots + a_k.$$

3.1.6 Věta

Buďte $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ posloupnosti, $c \in \mathbb{R}$, $m, k \in \mathbb{N}$, $m \leq k$. Pak

$$\begin{aligned}\sum_{i=m}^k c a_i &= c \sum_{i=m}^k a_i, \\ \sum_{i=m}^k (a_i \pm b_i) &= \sum_{i=m}^k a_i \pm \sum_{i=m}^k b_i.\end{aligned}$$

D.: Plyne přímo z distributivního a asociativního zákona. □

3.1.7 Věta

Buďte $\{a_n\}$ posloupnost, $m, k \in \mathbb{N}$, $m \leq k$. Označme $[a_n]_{n=m}^k = a_k - a_m$. Pak platí

$$\sum_{i=m}^k \Delta a_i = [a_i]_{i=m}^{k+1}.$$

D.: $\sum_{i=m}^k \Delta a_n = (a_{m+1} - a_m) + (a_{m+2} - a_{m+1}) + \cdots + (a_k - a_{k-1}) + (a_{k+1} - a_k) = a_{k+1} - a_m$. □

Věta ukazuje, že diference a sumace jsou v jistém smyslu inverzní operátory.

3.1.8 Věta (Sumace “per partes”)

Buďte $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ posloupnosti, $m, k \in \mathbb{N}$, $m \leq k$. Pak platí

$$\sum_{i=m}^k a_i \Delta b_i = [a_n b_n]_{n=m}^{k+1} - \sum_{i=m}^k (\Delta a_i) b_{i+1}.$$

D.: Podle 3.1.7 a 3.1.4.4 platí

$$[a_n b_n]_{n=m}^{k+1} = \sum_{i=m}^k \Delta(a_i b_i) = \sum_{i=m}^k ((\Delta a_i) b_{i+1} + a_i \Delta b_i) = \sum_{i=m}^k (\Delta a_i) b_{i+1} + \sum_{i=m}^k a_i \Delta b_i.$$

□

Příklad: Najděte součet $1 + 4 + 9 + \dots + n^2$.

Ř.:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n i^2 &= \sum_{i=1}^n i^2((i+1) - i) = \sum_{i=1}^n i^2 \Delta i = [i^3]_{i=1}^{n+1} - \sum_{i=1}^n (\Delta i^2)(i+1) = \\ &= (n+1)^3 - 1 - \sum_{i=1}^n ((i+1)^2 - i^2)(i+1) = n^3 + 3n^2 + 3n - \sum_{i=1}^n (2i+1)(i+1) = \\ &= n^3 + 3n^2 + 3n - \sum_{i=1}^n (2i^2 + 3i + 1) = n^3 + 3n^2 + 3n - \sum_{i=1}^n 1 - 3 \sum_{i=1}^n i - 2 \sum_{i=1}^n i^2 = \\ &= n^3 + 3n^2 + 3n - n - 3 \frac{n(n+1)}{2} - 2 \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{2n^3 + 6n^2 + 4n - 3n^2 - 3n}{2} - 2 \sum_{i=1}^n i^2. \end{aligned}$$

Odtud

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{2n^3 + 3n^2 + n}{6} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

□

3.1.9 Věta (Sztolz [1842 – 1903])

1. Nechť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost taková, že $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ a $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ je ryze monotonní posloupnost taková, že $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$. Jestliže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta a_n}{\Delta b_n} = c \in \mathbb{R}^*$, pak také $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c$.
2. Nechť $\{a_n\}$ je posloupnost a $\{b_n\}$ je neohraňčená rostoucí posloupnost. Jestliže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta a_n}{\Delta b_n} = c \in \mathbb{R}^*$, pak také $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c$.

D.: 1. Nechť pro určitost je $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ klesající.

- $c \in \mathbb{R}$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $k \in \mathbb{N}$, $k \geq n_0$ platí

$$c - \varepsilon < \frac{a_{k+1} - a_k}{b_{k+1} - b_k} = \frac{a_k - a_{k+1}}{b_k - b_{k+1}} < c + \varepsilon,$$

a poněvadž $b_{k+1} < b_k$, platí

$$(c - \varepsilon)(b_k - b_{k+1}) < a_k - a_{k+1} < (c + \varepsilon)(b_k - b_{k+1}).$$

Tato nerovnost platí pro každé $k \geq n_0$, tedy pro každé $m, n \in \mathbb{N}$, $m > n > n_0$ platí:

$$\begin{aligned} (c - \varepsilon)(b_n - b_{n+1}) &< a_n - a_{n+1} < (c + \varepsilon)(b_n - b_{n+1}) \\ (c - \varepsilon)(b_{n+1} - b_{n+2}) &< a_{n+1} - a_{n+2} < (c + \varepsilon)(b_{n+1} - b_{n+2}) \\ &\vdots & \vdots \\ (c - \varepsilon)(b_{m-1} - b_m) &< a_{m-1} - a_m < (c + \varepsilon)(b_{m-1} - b_m). \end{aligned}$$

Seštením těchto nerovností dostaneme

$$(c - \varepsilon)(b_n - b_m) < a_n - a_m < (c + \varepsilon)(b_n - b_m).$$

Podle 1.3.5.2 a 1.3.6 je $\lim_{m \rightarrow \infty} (c - \varepsilon)(b_n - b_m) = (c - \varepsilon)(b_n - \lim_{m \rightarrow \infty} b_m) = (c - \varepsilon)b_n$.

Podobně $\lim_{m \rightarrow \infty} (c + \varepsilon)(b_n - b_m) = (c + \varepsilon)b_n$, $\lim_{m \rightarrow \infty} (a_n - a_m) = a_n$. Tedy podle 1.3.5.1 je

$$(c - \varepsilon)b_n \leq a_n \leq (c + \varepsilon)b_n.$$

Poněvadž $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ je klesající a $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$, je $b_n > 0$ pro každé $n \in \mathbb{N}$ a tedy

$$c - \varepsilon \leq \frac{a_n}{b_n} \leq c + \varepsilon .$$

Tato nerovnost platí pro každé $n > n_0$, což znamená, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c$.

- $c = \infty$. Buď $K \in \mathbb{R}$ libovolné. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $k \in \mathbb{N}$, $k \geq n_0$ platí

$$\frac{a_{k+1} - a_k}{b_{k+1} - b_k} = \frac{a_k - a_{k+1}}{b_k - b_{k+1}} > K .$$

Odtud pro každé $m, n \in \mathbb{N}$, $m > n > n_0$ dostaneme:

$$\begin{array}{lcl} a_k - a_{k+1} > K(b_k - b_{k+1}) & / & \sum_{k=n}^{m-1} \\ a_n - a_m > K(b_n - b_m) & / & \lim_{m \rightarrow \infty} \\ a_n \geq Kb_n & / & \frac{1}{b_n} \\ \frac{a_n}{b_n} \geq K , & & \end{array}$$

což znamená, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \infty$.

- $c = -\infty$. Analogicky jako předchozí případ.

Je-li $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ rostoucí, provedeme důkaz analogicky.

- Nejdříve dokážeme pomocné tvrzení: Jsou-li $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ reálná čísla a $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ kladná reálná čísla, $m, M \in \mathbb{R}$ taková, že pro každé $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ platí $m < \frac{\alpha_i}{\beta_i} < M$, pak

$$m < \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_k}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k} < M .$$

Důkaz provedem úplnou indukcí vzhledem ke k .

$m < \frac{\alpha_1}{\beta_1} < M$ je splněno triviálně.

Z indukčního předpokladu $m < \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{k-1}}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{k-1}} < M$, neboli

$$m(\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{k-1}) < \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_{k-1} < M(\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{k-1})$$

a z předpokladu tvrzení

$$m\beta_k < \alpha_k < M\beta_k$$

dostaneme sečtením dokazovanou nerovnost.

- $c \in \mathbb{R}$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_1$ platí

$$c - \frac{\varepsilon}{2} < \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} < c + \frac{\varepsilon}{2} .$$

Poněvadž $\{b_n\}$ je podle předpokladu neohraničená a rostoucí, lze bez újmy na obecnosti předpokládat $b_{n_1} \geq 0$.

Položme $\alpha_1 = a_{n_1+1} - a_{n_1}$, $\alpha_2 = a_{n_1+2} - a_{n_1+1}, \dots, \alpha_k = a_n - a_{n-1}$,

$$\beta_1 = b_{n_1+1} - b_{n_1}, \beta_2 = b_{n_1+2} - b_{n_1+1}, \dots, \beta_k = b_n - b_{n-1} .$$

Podle pomocného tvrzení je $c - \frac{\varepsilon}{2} < \frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} < c + \frac{\varepsilon}{2}$, neboli

$$\left| \frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} - c \right| < \frac{\varepsilon}{2} .$$

Dále platí

$$\begin{aligned}
\left| \frac{a_n}{b_n} - c \right| &= \left| \frac{a_n - a_{n_1}}{b_n} + \frac{a_{n_1}}{b_n} - c \right| = \left| \frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} \frac{b_n - b_{n_1}}{b_n} + \frac{a_{n_1}}{b_n} - c \right| = \\
&= \left| \left(\frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} - c \right) \frac{b_n - b_{n_1}}{b_n} + \frac{b_n - b_{n_1}}{b_n} c + \frac{a_{n_1}}{b_n} - c \right| = \\
&= \left| \left(\frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} - c \right) \frac{b_n - b_{n_1}}{b_n} + \frac{(b_n - b_{n_1})c + a_{n_1} - cb_n}{b_n} \right| = \\
&= \left| \left(\frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} - c \right) \left(1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} \right) + \frac{a_{n_1} - cb_{n_1}}{b_n} \right| \leq \\
&\leq \left| \frac{a_n - a_{n_1}}{b_n - b_{n_1}} - c \right| \left| 1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} \right| + \left| \frac{a_{n_1} - cb_{n_1}}{b_n} \right|.
\end{aligned}$$

Poněvadž podle 1.3.12.5 a 1.3.12.4 je $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n_1}}{b_n} = 0$ a pro $n > n_1$ je $\frac{b_{n_1}}{b_n} \geq 0$, tak existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, $n_2 > n_1$ takové, že pro $n \geq n_2$ platí $0 \leq 1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} \leq 1$, neboli

$$\left| 1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} \right| \leq 1.$$

Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n_1} - cb_{n_1}}{b_n} = 0$, existuje $n_3 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_3$ platí

$$\left| \frac{a_{n_1} - cb_{n_1}}{b_n} \right| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Tedy pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2, n_3\}$ platí

$$\left| \frac{a_n}{b_n} - c \right| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon,$$

což znamená, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c$.

- $c = \infty$. Buďte $h \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolná čísla.

Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \infty$, existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $k \geq n_1$ je

$$\frac{a_{k+1} - a_k}{b_{k+1} - b_k} > 2(h + \varepsilon),$$

neboli vzhledem k tomu, že $b_{k+1} - b_k > 0$

$$a_{k+1} - a_k > 2(h + \varepsilon)(b_{k+1} - b_k).$$

Sečtením těchto nerovnic pro k od n_1 do $n - 1$ dostaneme

$$\begin{aligned}
a_n - a_{n_1} &> 2(h + \varepsilon)(b_n - b_{n_1}) \\
\frac{a_n}{b_n} &> 2(h + \varepsilon) \left(1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} \right) + \frac{a_{n_1}}{b_n}.
\end{aligned}$$

Poněvadž podle 1.3.12.5 a 1.3.12.4 je $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_{n_1}}{b_n} = 0$ a $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n_1}}{b_n} = 0$, existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ platí

$$\left| \frac{b_{n_1}}{b_n} \right| < \frac{1}{2}, \quad \text{neboli} \quad 1 - \frac{b_{n_1}}{b_n} > \frac{1}{2}$$

a existuje $n_3 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_3$ platí

$$\frac{a_{n_1}}{b_n} > -\varepsilon.$$

Tedy pro $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2, n_3\}$ platí

$$\frac{a_n}{b_n} > 2(h + \varepsilon)\frac{1}{2} - \varepsilon = h,$$

což znamená, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \infty$.

- $c = -\infty$. Analogicky jako předchozí případ.

□

Poznámky:

- Předpoklad o ryzi monotonii posloupnosti $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ v první části věty obecně nelze vynechat.

Je-li například $a_n = \frac{1}{n}$ a $b_n = \frac{(-1)^n}{n}$, pak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$,

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}}{(-1)^{n+1}(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n})} = \lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^{n+1} \frac{n - n - 1}{n + n + 1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{2n + 1} = 0$ podle 1.3.12.4, avšak

$\frac{a_n}{b_n} = \frac{\frac{1}{n}}{\frac{(-1)^n}{n}} = (-1)^n$ a posloupnost $\{(-1)^n\}_{n=1}^{\infty} = \{-1, 1, -1, 1, -1, 1, \dots\}$ je oscilující.

• Jestliže neexistuje vlastní ani nevlastní $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_n}{b_{n+1} - b_n}$ a ostatní předpoklady Sztolzovy věty jsou splněny, nelze nic tvrdit o existenci $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n}$.

Je-li například $a_n = \frac{(-1)^n}{n^2}$, $b_n = \frac{1}{n}$, pak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, $\{b_n\}$ je klesající a $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$. Přitom

$$\frac{\Delta a_n}{\Delta b_n} = \frac{\frac{(-1)^{n+1}}{(n+1)^2} - \frac{(-1)^n}{n^2}}{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}} = \frac{(-1)^{n+1} \frac{n^2 + (n+1)^2}{n^2(n+1)^2}}{\frac{n - (n+1)}{n(n+1)}} = (-1)^n \frac{2n^2 + 2n + 1}{n^2 + n}$$

a posloupnost $\left\{(-1)^n \frac{2n^2 + 2n + 1}{n^2 + n}\right\} = \left\{-\frac{5}{2}, \frac{13}{6}, -\frac{25}{12}, \frac{41}{20}, -\frac{61}{30}, \frac{85}{42}, \dots\right\}$ nemá limitu. Ale

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(-1)^n}{n} = 0.$$

Příklad: Rozhodněte, zda posloupnost $\left\{\frac{(n!)^2}{(2n)!}\right\}$ je konvergentní a pokud ano, určete její limitu.

Ř.: Označme $a_n = \frac{(n!)^2}{(2n)!}$. Pak pro každé $n \in \mathbb{N}$ platí $a_n \geq 0$ a

$$\begin{aligned} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \frac{((n+1)!)^2 (2n)!}{(2(n+1))! (n!)^2} = \frac{(n+1)^2}{(2n+2)(2n+1)} = \frac{n+1}{2(2n+1)} = \frac{n + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}}{4(n + \frac{1}{2})} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8(n + \frac{1}{2})} \leq \\ &\leq \frac{1}{4} + \frac{1}{8(1 + \frac{1}{2})} \leq \frac{1}{4} + \frac{1}{12} = \frac{5}{12} < 1, \end{aligned}$$

neboli $a_{n+1} < a_n$. To znamená, že $\{a_n\}$ je klesající, zdola ohraničená posloupnost a tedy podle 1.3.9 existuje $a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in \mathbb{R}$.

Posloupnost $\{(2n)!\}$ je rostoucí a neohraničená, tedy

$$\begin{aligned} a &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n!)^2}{(2n)!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{((n+1)!)^2 - (n!)^2}{(2n+2)! - (2n)!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n!)^2((n+1)^2 - 1)}{((2n)!)^2((2n+2)(2n+1) - 1)} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n!)^2}{(2n)!} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2 + 2n}{4n^2 + 6n + 1} = a \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{n}}{4 + \frac{6}{n} + \frac{1}{n^2}} = \frac{1}{4}, \end{aligned}$$

neboli $a = \frac{1}{4}a$. Odtud $a = 0$. □

3.2 Rovinné křivky

3.2.1 Definice

Nechť $I \subseteq \mathbb{R}$ je interval, $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}$ spojité funkce. Množina $C = \{(\varphi(t), \psi(t)) : t \in I\} \subseteq \mathbb{R}^2$ se nazývá (rovinná) křivka, funkce φ, ψ se nazývají parametrizace křivky C .

Je-li $I = [a, b]$, body $A = (\varphi(a), \psi(a))$, $B = (\varphi(b), \psi(b))$ se nazývají krajní body křivky C . Křivka C se nazývá uzavřená, jestliže $A = B$.

- Jedna křivka může mít více parametrizací. Například

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \cos t, & \tilde{\varphi}(t) &= \cos 2t, & \hat{\varphi}(t) &= \cos t \\ \psi(t) &= \sin t, & \tilde{\psi}(t) &= \sin 2t, & \hat{\psi}(t) &= -\sin t, \end{aligned} \quad t \in [0, 2\pi],$$
 jsou tři různé parametrizace kružnice se středem $(0, 0)$ a poloměrem 1.

- Je-li f spojitá funkce, $\text{Dom } f$ je interval, pak graf funkce f je křivka s parametrizací

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= t \\ \psi(t) &= f(t), \end{aligned} \quad t \in \text{Dom } f.$$

- Je-li $C = \{(\varphi(t), \psi(t)) : t \in I\}$ křivka, t_0 vnitřní bod intervalu I a funkce φ je na okolí bodu t_0 ryze monotónní (k tomu stačí, aby φ měla v bodě t_0 spojitou derivaci a $\varphi'(t_0) \neq 0$), pak existuje interval $J \subseteq \mathbb{R}$, který obsahuje bod $\varphi(t_0)$ a existuje funkce f definovaná na J tak, že $\{(x, f(x)) : x \in J\} \subseteq C$.

D.: Nechť existuje okolí $\mathcal{O}(t_0)$ bodu t_0 takové, že φ je na $\mathcal{O}(t_0)$ ryze monotónní. Na $\mathcal{O}(t_0)$ existuje funkce φ^{-1} inverzní k funkci φ . Označme $J = \varphi(\mathcal{O}(t_0))$. Pro $x = \varphi(t) \in J$ definujeme $f(x) = \psi(\varphi^{-1}(x))$. \square

3.2.2 Poznámka o derivaci funkcí daných parametricky

- Nechť $C = \{(\varphi(t), \psi(t)) : t \in I\}$ je křivka, φ, ψ mají spojitou derivaci na I a nechť $\varphi'(t) \neq 0$ pro každé $t \in I$. Pak existuje funkce f definovaná na intervalu $J = \{\varphi(t) : t \in I\}$, která má na tomto intervalu derivaci, přičemž platí $f'(x) = \frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}$ pro $x = \varphi(t) \in J$.

D.: Ze spojitosti φ' a z podmínky $\varphi'(t) \neq 0$ na I plyne, že $\varphi'(t) > 0$ pro každé $t \in I$, nebo $\varphi'(t) < 0$ pro každé $t \in I$ a tedy podle 2.7.2 je φ na I ryze monotónní. Podle 1.2.16.2 existuje funkce φ^{-1} inverzní k φ .

Definujeme $f(x) = \psi(\varphi^{-1}(x))$ pro $x = \varphi(t)$.

Podle 2.3.6 a 2.3.7 je $f'(x) = [\psi(\varphi^{-1}(x))]' = \psi'(\varphi^{-1}(x)) \frac{1}{\varphi'(t)} = \frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}$. \square

- Nechť jsou splněny podmínky předchozího tvrzení a nechť funkce φ, ψ mají na I druhé derivace. Pak také funkce f má na J druhou derivaci a platí $f''(x) = \frac{\varphi'(t)\psi''(t) - \varphi''(t)\psi'(t)}{(\varphi'(t))^3}$ pro $x = \varphi(t) \in J$.

D.: $f''(x) = (f'(x))' = \left(\frac{\psi'(\varphi^{-1}(x))}{\varphi'(\varphi^{-1}(x))} \right)' = \frac{\varphi'(\varphi^{-1}(x))\psi''(\varphi^{-1}(x)) - \varphi''(\varphi^{-1}(x))\psi'(\varphi^{-1}(x))}{(\varphi'(\varphi^{-1}(x)))^2} \frac{1}{\varphi'(t)}$. \square

- Analogicky lze postupovat při výpočtu vyšších derivací.

- S použitím „diferenciální symboliky“ lze předchozí tvrzení zapsat:

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} = \frac{d\psi(t)}{d\varphi(t)} = \frac{\psi'(t)dt}{\varphi'(t)dt} = \frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}},$$

$$f''(x) = \frac{df'(x)}{dx} = \frac{d\frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}}{\varphi'(t)dt} = \frac{\frac{\psi''(t)\varphi'(t) - \psi'(t)\varphi''(t)}{(\varphi'(t))^2} dt}{\varphi'(t)dt} = \frac{\psi''(t)\varphi'(t) - \psi'(t)\varphi''(t)}{(\varphi'(t))^3} = \frac{\frac{d^2y}{dt^2} \frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \frac{d^2x}{dt^2}}{\left(\frac{dx}{dt}\right)^3}.$$

3.2.3 Definice

Řekneme, že křivka C je *oblouk (jednoduchá křivka)*, jestliže existuje její parametrizace φ, ψ taková, že zobrazení $t \mapsto (\varphi(t), \psi(t))$ je bijektivní.

Křivka se nazývá *jordanovská (jednoduchá uzavřená)*, jestliže je uzavřená a existuje její parametrizace $\varphi, \psi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ taková, že platí implikace $t_1, t_2 \in [a, b], 0 < |t_1 - t_2| < b - a \Rightarrow (\varphi(t_1), \psi(t_1)) \neq (\varphi(t_2), \psi(t_2))$.

Jestliže křivka C není uzavřená a není obloukem, pak pro její libovolnou parametrizaci $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}$ existují $t_1, t_2 \in I, t_1 \neq t_2$ tak, že $(\varphi(t_1), \psi(t_1)) = (\varphi(t_2), \psi(t_2))$. Bod $(\varphi(t_1), \psi(t_1)) = (\varphi(t_2), \psi(t_2))$ se nazývá *vícenásobný bod (bod větvení) křivky C* .

3.2.4 Definice

Buď C křivka, $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}$ její parametrizace. Nechť t_0 je vnitřní bod intervalu I a $A = (\varphi(t_0), \psi(t_0))$ není vícenásobný bod křivky C a nechť existují derivace $\varphi'(t_0), \psi'(t_0)$ a platí $(\varphi'(t_0))^2 + (\psi'(t_0))^2 \neq 0$. Přímka τ procházející bodem A , jejíž směrový vektor je $(\varphi'(t_0), \psi'(t_0))$ se nazývá *tečna ke křivce C v bodě A* .

3.2.5 Poznámka

Nechť křivka C je grafem funkce f , $\text{Dom } f$ je interval a f má derivaci v bodě x_0 . Pak

$\varphi(t) = t$
 $\psi(t) = f(t), t \in \text{Dom } f$ je parametrizací C .

$\varphi'(t) = 1, \psi'(t) = f'(t)$. Tečna ke křivce C v bodě $(x_0, f(x_0))$ má parametrické rovnice
$$\begin{aligned} x &= x_0 + t \\ y &= f(x_0) + f'(x_0)t \end{aligned}$$

Eliminací parametru t dostaneme obecnou rovnici tečny $x - x_0 = \frac{y - f(x_0)}{f'(x_0)}$, neboli $y - y_0 = f'(x_0)(x - x_0)$.

Tedy definice 3.2.4 souhlasí s tím, jak byla tečna ke grafu funkce zavedena v 2.3.2.7.

Příklad:

$C : \begin{cases} x = \varphi(t) = a \cos^3 t \\ y = \psi(t) = a \sin^3 t \end{cases}, t \in [0, 2\pi], a \in \mathbb{R}, a > 0$ je jordanovskou křivkou.

$\varphi'(t) = -3a \cos^2 t \sin t, \psi'(t) = 3a \sin^2 t \cos t$.

Tečna ke křivce C existuje v každém bodě $(\varphi(t), \psi(t))$ takovém, že

$0 \neq (\varphi'(t))^2 + (\psi'(t))^2 = 9a^2 \cos^4 t \sin^2 t + 9a^2 \sin^4 t \cos^2 t = 9a^2 \sin^2 t \cos^2 t$, tedy pro $t \notin \{0, \frac{1}{2}\pi, \pi, \frac{3}{2}\pi\}$.

3.2.6 Definice

Nechť C je oblouk nebo jordanovská křivka. C se nazývá *hladká*, existuje-li její parametrizace $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}$ taková, že

- (i) $\varphi'(t), \psi'(t)$ existují pro každý vnitřní bod $t \in I$. Je-li C uzavřená, $I = [a, b]$, existují $\varphi'_+(a), \varphi'_-(b), \psi'_+(a), \psi'_-(b)$ a platí $\varphi'_+(a) = \varphi'_-(b), \psi'_+(a) = \psi'_-(b)$.
- (ii) $(\varphi'(t))^2 + (\psi'(t))^2 \neq 0$ pro každý vnitřní bod $t \in I$. Je-li C uzavřená, $I = [a, b]$, navíc platí $(\varphi'_+(a))^2 + (\psi'_+(a))^2 \neq 0 \neq (\varphi'_-(b))^2 + (\psi'_-(b))^2$.

C se nazývá *po částech hladká*, existuje-li konečný počet hladkých křivek C_1, C_2, \dots, C_n takových, že $C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n$.

Křivka je hladká, jestliže nemá vícenásobné body a existuje k ní tečna v každém bodě, který není krajní.

3.2.7 Definice

Budte $C_1 = \{(\varphi_1(t), \psi_1(t)) : t \in I_1\}, C_2 = \{(\varphi_2(t), \psi_2(t)) : t \in I_2\}$ křivky a nechť $(x_0, y_0) = (\varphi_1(t_1), \psi_1(t_1)) = (\varphi_2(t_2), \psi_2(t_2)) \in C_1 \cap C_2$ není ani krajní ani vícenásobný bod žádné z křivek C_1, C_2 . Řekneme, že křivky C_1 a C_2 mají v bodě (x_0, y_0) *styk řádu alespoň $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$* , jestliže

buď existují kladná čísla δ_0, δ a funkce f_1, f_2 takové, že

$$(t_1 - \delta, t_1 + \delta) \subseteq I_1, (t_2 - \delta, t_2 + \delta) \subseteq I_2, (x_0 - \delta_0, x_0 + \delta_0) \subseteq \text{Dom } f_1 \cap \text{Dom } f_2,$$

$$\{(x, f_1(x)) : x_0 - \delta_0 < x < x_0 + \delta_0\} = \{(\varphi_1(t), \psi_1(t)) : t_1 - \delta < t < t_1 + \delta\},$$

$$\{(x, f_2(x)) : x_0 - \delta_0 < x < x_0 + \delta_0\} = \{(\varphi_2(t), \psi_2(t)) : t_2 - \delta < t < t_2 + \delta\},$$

a funkce f_1, f_2 mají v bodě x_0 styk řádu alespoň n ,

nebo existují kladná čísla $\varepsilon_0, \varepsilon$ a funkce g_1, g_2 takové, že

$$(t_1 - \varepsilon, t_1 + \varepsilon) \subseteq I_1, (t_2 - \varepsilon, t_2 + \varepsilon) \subseteq I_2, (y_0 - \varepsilon_0, y_0 + \varepsilon_0) \subseteq \text{Dom } g_1 \cap \text{Dom } g_2,$$

$$\{(y, g_1(y)) : y_0 - \varepsilon_0 < y < y_0 + \varepsilon_0\} = \{(\varphi_1(t), \psi_1(t)) : t_1 - \varepsilon < t < t_1 + \varepsilon\},$$

$$\{(y, g_2(y)) : y_0 - \varepsilon_0 < y < y_0 + \varepsilon_0\} = \{(\varphi_2(t), \psi_2(t)) : t_2 - \varepsilon < t < t_2 + \varepsilon\},$$

a funkce g_1, g_2 mají v bodě y_0 styk řádu alespoň n

3.2.8 Definice

Nechť C je křivka, K je kružnice se středem (x_S, y_S) a poloměrem r a $(x_0, y_0) \in C \cap K$.

Kružnice K se nazývá *oskulační kružnice křivky C v bodě (x_0, y_0)* , jestliže křivky C, K mají v bodě (x_0, y_0) styk řádu alespoň 2.

Střed oskulační kružnice se nazývá *střed křivosti křivky C v bodě (x_0, y_0)* , poloměr oskulační kružnice se nazývá *poloměr křivosti křivky C v bodě (x_0, y_0)* , jeho převrácená hodnota $\frac{1}{r}$ se nazývá *křivost křivky C v bodě (x_0, y_0)* . Množina všech středů křivosti křivky C ve všech jejích bodech se nazývá *evoluta křivky C* .

3.2.9 Věta

Buď $C = \{(\varphi(t), \psi(t)) : t \in I\}$ hladká křivka, t_0 vnitřní bod intervalu I a nechtě funkce φ, ψ mají v bodě t_0 druhé derivace. Nechtě $(x_0, y_0) = (\varphi(t_0), \psi(t_0))$ není vícenásobný bod křivky C a platí $\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0) \neq 0$. Pak má křivka C v bodě (x_0, y_0) jedinou oskulační kružnici o středu (x_S, y_S) a poloměru r , kde

$$x_S = \varphi(t_0) - \frac{(\varphi'(t_0))^2 + (\psi'(t_0))^2}{\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0)}\psi'(t_0),$$

$$y_S = \psi(t_0) + \frac{(\varphi'(t_0))^2 + (\psi'(t_0))^2}{\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0)}\varphi'(t_0),$$

$$r = \frac{((\varphi'(t_0))^2 + (\psi'(t_0))^2)^{3/2}}{|\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0)|}.$$

D.: Poznamenejme, že z existence druhé derivace funkce φ v bodě t_0 plyne spojitost její první derivace v tomto bodě.

Nechť nejprve $\varphi'(t_0) \neq 0$. Pak nastává první případ z definice 3.2.7.

Nechť $K = \{(x_S + r \cos t, y_S + r \sin t) : t \in [0, 2\pi]\}$ je oskulační kružnice křivky C v bodě $(x_0, y_0) = (\varphi(t_0), \psi(t_0)) = (x_S + r \cos \tau_0, y_S + r \sin \tau_0)$.

Podle 2.6.3 je

$$\psi(\varphi^{-1}(x_0)) = f(x_0), \psi'(\varphi^{-1}(x_0)) = f'(x_0), \psi''(\varphi^{-1}(x_0)) = f''(x_0),$$

kde f je funkce definovaná v okolí bodu x_0 a daná parametricky rovnicemi kružnice K . Podle 3.2.2 je

$$\psi'(\varphi^{-1}(x_0)) = \frac{\psi'(t_0)}{\varphi'(t_0)} = \frac{r \cos \tau_0}{-r \sin \tau_0} = -\cotg \tau_0,$$

$$\psi''(\varphi^{-1}(x_0)) = \frac{\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0)}{(\varphi'(t_0))^3} = \frac{(-r \sin \tau_0)(-r \sin \tau_0) - (-r \cos \tau_0)(r \cos \tau_0)}{-r^3 \sin^3 \tau_0} =$$

$$= \frac{1}{r \sin^3 \tau_0}.$$

Máme tedy soustavu čtyř rovnic pro čtyři neznámé τ_0, x_S, y_S, r :

$$\begin{aligned}\varphi(t_0) &= x_S + r \cos \tau_0, \\ \psi(t_0) &= y_S + r \sin \tau_0, \\ \frac{\psi'(t_0)}{\varphi'(t_0)} &= -\cotg \tau_0, \\ \frac{\varphi'(t_0)\psi''(t_0) - \varphi''(t_0)\psi'(t_0)}{(\varphi'(t_0))^3} &= -\frac{1}{r \sin^3 \tau_0},\end{aligned}$$

kteřá má jediné řešení dané formullemi v tvrzení věty.

Nechť nyní $\varphi'(t_0) = 0$. Pak, poněvadž křivka C je hladká, ze vztahu $(\varphi'(t_0))^2 + (\psi'(t_0))^2 \neq 0$ plyne $\psi'(t_0) \neq 0$ a nastává druhý případ z definice 3.2.7. Tento případ vyšetříme analogicky. \square

3.2.10 Důsledek

Nechť funkce f má v bodě x_0 druhou derivaci $f''(x_0) \neq 0$. Pak graf funkce f má v bodě $(x_0, f(x_0))$ oskulační kružnici, pro jejíž střed a poloměr platí

$$x_S = x_0 - \frac{1 + (f'(x_0))^2}{f''(x_0)} f'(x_0), \quad y_S = f(x_0) + \frac{1 + (f'(x_0))^2}{f''(x_0)}, \quad r = \frac{(1 + (f'(x_0))^2)^{3/2}}{|f''(x_0)|}.$$

Příklady:

1. Určete křivost paraboly $y = x^2$ v jejím vrcholu.

Ř.: $f(x) = x^2, f'(x) = 2x, f'(0) = 0, f''(x) = 2, \frac{1}{r} = 2. \square$

2. Najděte evolutu elipsy $\begin{cases} \varphi(t) = a \cos t \\ \psi(t) = b \sin t \end{cases}, t \in [0, 2\pi]$.

Ř.: $\begin{aligned}\varphi'(t) &= -a \sin t, \varphi''(t) = -a \cos t, \\ \psi'(t) &= b \cos t, \psi''(t) = -b \sin t, \\ (\varphi'(t))^2 + (\psi'(t))^2 &= a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t, \\ \varphi'(t)\psi''(t) - \varphi''(t)\psi'(t) &= ab \sin^2 t + ab \cos^2 t = ab.\end{aligned}$

Parametrické rovnice evoluty:

$$\begin{aligned}x &= a \cos t - \frac{a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t}{ab} b \cos t = \frac{\cos t}{a} (a^2 - a^2 \sin^2 t - b^2 \cos^2 t) = \frac{a^2 - b^2}{a} \cos^3 t \\ y &= b \sin t - \frac{a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t}{ab} a \sin t = \frac{\sin t}{b} (b^2 - a^2 \sin^2 t - b^2 \cos^2 t) = \frac{b^2 - a^2}{b} \sin^3 t\end{aligned}$$

\square

| | Rovnice v kartézských souřadnicích | Parametrické rovnice | Rovnice v polárních souřadnicích |
|-------------------------|--|--|---|
| Kružnice | $x^2 + y^2 = a^2$ | $x = a \cos t$ $y = a \sin t$ | $r = a$ |
| Elipsa | $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ | $x = a \cos t$ $y = b \sin t$ | $r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \varphi}, \quad 0 < \varepsilon < 1$ |
| Parabola | $y^2 = 2px$ | $x = \frac{1}{2p}t^2$ $y = t$ | $r = \frac{p}{1 + \cos \varphi}$ |
| Hyperbola | $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$ | $x = \frac{a}{\cos t}$ $y = \pm b \operatorname{tg} t$ | $r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \varphi}, \quad \varepsilon > 1$ |
| Cassiniovy křivky | $(x^2 + y^2)^2 - 2e^2(x^2 - y^2) = a^4 - e^4$ | | $r^2 = e^2 \cos^2 2\varphi \pm \sqrt{e^4 \cos^2 2\varphi + a^4 - e^4}$ |
| Bernoulliova lemniskáta | $(x^2 + y^2)^2 = 2a^2(x^2 - y^2)$ | $x = \sqrt{2}at \frac{1+t^2}{1+t^4}$ $y = \sqrt{2}at \frac{1-t^2}{1+t^4}$ | $r = a\sqrt{2 \cos^2 2\varphi},$ $\varphi \in [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}] \cup [\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}]$ |
| Cykloida | $x + \sqrt{2ay - y^2} = a \arccos \frac{a-y}{a}$ $x - \sqrt{2ay - y^2} = a \left(2\pi - \arccos \frac{a-y}{a} \right)$ | $x = a(t - \sin t)$ $y = a(1 - \cos t)$ | |
| Kardioda (srdcovka) | $(x^2 + y^2 - a^2)^2 = 4a^2((x-a)^2 + y^2)$ | $x = a(2 \cos t - \cos 2t)$ $y = a(2 \sin t - \sin 2t)$ | $r = 2a(1 - \cos \varphi)$ |
| Asteroida (hvězdice) | $x^{2/3} + y^{2/3} = a^{2/3}$ | $x = a \cos^3 \frac{t}{4}$ $y = a \sin^3 \frac{t}{4}$ | |
| Archimedova spirála | $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a}$ | | $r = a\varphi, \quad \varphi \geq 0$ |
| Hyperbolická spirála | $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \frac{a}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ | | $r = \frac{a}{\varphi}$ |
| Logaritmická spirála | $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \left(\frac{1}{k} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a} \right)$ | | $r = ae^{k\varphi}$ |

Tabulka 3.1: Některé křivky

Část II

Integrální počet funkcí jedné proměnné

Kapitola 4

Neurčitý integrál

4.1 Primitivní funkce

4.1.1 Definice

Budte f, F funkce definované na intervalu I . Řekneme, že funkce F je *primitivní k funkci* (je *neurčitým integrálem z funkce*) f na I , jestliže na tomto intervalu platí $F' = f$. Označení: $F(x) = \int f(x)dx$.

4.1.2 Poznámky

1. Pokud některý z krajních bodů intervalu I do tohoto intervalu patří, je potřeba v tomto bodě uvažovat příslušnou jednostrannou derivaci.
2. Primitivní funkce je podle 2.3.3 spojitá na I .
3. Primitivní funkce bývá někdy definována obecněji: F je primitivní k f na I , jestliže množina $\{x \in I : F'(x) \neq f(x)\}$ je nejvýše spočetná. ($F'(x) = f(x)$ skoro všude na I .)
V tomto smyslu je například $F(x) = |x|$ zobecněnou primitivní funkcí k $f(x) = \operatorname{sgn} x$ na $I = (-\infty, \infty)$.

4.1.3 Příklady

1. $\frac{x^3}{3} = \int x^2 dx$ na $(-\infty, \infty)$.

2. $\ln x = \int \frac{1}{x} dx$ na $(0, \infty)$
 $\ln(-x) = \int \frac{1}{x} dx$ na $(-\infty, 0)$ \Rightarrow $\ln|x| = \int \frac{1}{x} dx$ na intervalu, který neobsahuje 0.

4.1.4 Věta (o existenci primitivní funkce)

Ke každé funkci spojitě na intervalu I existuje na tomto intervalu funkce primitivní.

D.: Bude proveden později (5.3.6). \square

4.1.5 Věta

Je-li F funkce primitivní k f na I a $c \in \mathbb{R}$, pak $F + c$ je rovněž primitivní k f na I .

Jsou-li F a G funkce primitivní k funkci f na intervalu I , pak existuje konstanta $c \in \mathbb{R}$ taková, že $G(x) = F(x) + c$ pro každé $x \in I$.

Je-li F funkce primitivní k f na I pak $\{F + c : c \in \mathbb{R}\}$ je množina všech funkcí primitivních k funkci f na I .

D.: $(F(x) + c)' = F'(x) + 0 = f(x)$, druhé tvrzení plyne z 2.5.4.3, třetí je důsledkem prvních dvou. \square

4.1.6 Nejdůležitější neurčité integrály

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}, \quad n \neq -1$$

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x|$$

$$\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a}, \quad a > 0, a \neq 1$$

$$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x = -\operatorname{arccotg} x$$

$$\int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \frac{dx}{1-x^2} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right|$$

$$\int \cos x dx = \sin x$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x = -\arccos x$$

$$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{cotg} x$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm 1}} = \ln|x + \sqrt{x^2 \pm 1}|$$

$$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x$$

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)} dx = \ln|f(x)|.$$

Každý z uvedených vzorců platí na libovolném intervalu, na němž je funkce za znakem \int definována. Platnost uvedených vzorců lze ověřit derivováním.

4.1.7 Věta

Nechť $\int f_i(x) dx = F_i(x)$ na intervalu I , $c_i \in \mathbb{R}$ pro $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Pak

$$\int (c_1 f_1(x) + c_2 f_2(x) + \dots + c_n f_n(x)) dx = c_1 F_1(x) + c_2 F_2(x) + \dots + c_n F_n(x) \text{ na } I.$$

D.: Plyne přímo z 2.3.5. \square

Věta říká, že neurčitý integrál je lineární operátor na množině funkcí.

4.1.8 Věta

Nechť $\int f(x) dx = F(x)$ na I . Pak $\int f(ax+b) dx = \frac{1}{a} F(ax+b)$ na $J = \{x \in \mathbb{R} : ax+b \in I\}$.

D.: Podle 2.3.6 je $\left[\frac{1}{a} F(ax+b) \right]' = \frac{1}{a} F'(ax+b)[ax+b]' = F'(ax+b) = f(ax+b)$. \square

4.1.9 Příklad

$$\int \cos^2 x dx = \int \frac{1 + \cos 2x}{2} dx = \frac{1}{2} \left(x + \frac{\sin 2x}{2} \right) = \frac{x + \sin x \cos x}{2}$$

4.1.10 Věta (metoda “per partes”)

Nechť funkce u, v mají derivaci na intervalu I . Existuje-li na I primitivní funkce k jedné z funkcí $u'v, uv'$, existuje i ke druhé z nich a platí $\int u'(x)v(x) dx + \int u(x)v'(x) dx = u(x)v(x)$ na I .

D.: Nechť existuje primitivní funkce k $u'v$. Podle 2.3.5 je $(uv)' = u'v + uv'$, tedy $uv' = (uv)' - u'v$.
 $\int (u(x)v(x))' dx = u(x)v(x)$ na I , $\int u'(x)v(x) dx$ existuje a tedy podle 4.1.7
 $\int u(x)v'(x) dx = u(x)v(x) - \int u'(x)v(x) dx$ na I , což je vzorec z tvrzení věty. \square

4.1.11 Poznámky

1. Je-li alespoň jedna z derivací u', v' spojitá na I , jsou předpoklady věty 4.1.10 splněny.

2. Vzorec uvedený v 4.1.10 ve tvaru

$$\int u(x)v'(x)dx = u(x)v(x) - \int u'(x)v(x)dx$$

dává metodu integrace v případě, kdy integrovaná funkce je součinem dvou funkcí, z nichž jedna je derivací známé funkce.

3. Metodou „per partes“ jsou řešitelné zejména tyto typy integrálů:

- $\int x^n e^{ax} dx$: $u(x) = x^n$, $v' = e^{ax}$
- $\int x^n \cos ax dx$: $u(x) = x^n$, $v' = \cos ax$
- $\int x^n \sin ax dx$: $u(x) = x^n$, $v' = \sin ax$
- $\int x^n \operatorname{arctg} ax dx$: $u(x) = \operatorname{arctg} ax$, $v' = x^n$
- $\int x^n \operatorname{arccotg} ax dx$: $u(x) = \operatorname{arccotg} ax$, $v' = x^n$
- $\int x^n \operatorname{arccos} ax dx$: $u(x) = \operatorname{arccos} ax$, $v' = x^n$
- $\int x^n \operatorname{arcsin} ax dx$: $u(x) = \operatorname{arcsin} ax$, $v' = x^n$
- $\int x^a \log_b^n x dx$: $u(x) = \log_b^n x$, $v' = x^a$

Příklad:

$$\int \ln x dx = x \ln x - \int dx = x \ln x - x = x \ln \frac{x}{e}$$

$$u = \ln x \quad u' = \frac{1}{x}$$

$$v' = 1 \quad v = x$$

4.1.12 Věta (substituční metoda)

Nechť f je funkce definovaná na intervalu I a φ je prostá funkce, která má derivaci na intervalu J takovém, že $\varphi(J) = I$. $\int f(x)dx$ existuje na I právě tehdy, když na J existuje $\int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$; v tomto případě platí:

$$F(x) = \int f(x)dx = \int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt = F(\varphi(t)), \quad G(t) = \int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt = \int f(x)dx = G(\varphi^{-1}(x)).$$

D.: Podle 2.3.6 pokud $\frac{d}{dx}F(x) = f(x)$, pak $\frac{d}{dt}F(\varphi(t)) = F'(\varphi(t))\varphi'(t) = f(\varphi(t))\varphi'(t)$.

Podle 2.3.6 a 2.3.7 pokud $\frac{d}{dt}G(t) = f(\varphi(t))\varphi'(t)$, pak

$$\frac{d}{dx}G(\varphi^{-1}(x)) = G'(\varphi^{-1}(x))\frac{1}{\varphi'(t)} = f(\varphi(\varphi^{-1}(x)))\varphi'(\varphi^{-1}(x))\frac{1}{\varphi'(\varphi^{-1}(x))} = f(x). \quad \square$$

Schéma použití věty je jednoduché:

$$\int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt = \int f(x)dx = F(x) = F(\varphi(t))$$

$$\varphi(t) = x$$

$$\varphi'(t)dt = dx$$

nebo

$$\int f(x)dx = \int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt = G(t) = G(\varphi^{-1}(x))$$

$$x = \varphi(t)$$

$$dx = \varphi'(t)dt$$

4.1.13 Příklad

$$\int \sqrt{1-x^2} dx = \int \sqrt{1-\sin^2 t} \cos t dt = \int \cos^2 t dt = \frac{t + \sin t \cos t}{2} = \frac{\arcsin x + x\sqrt{1-x^2}}{2}$$

$$\begin{aligned} x &= \sin t \\ dx &= \cos t dt \end{aligned}$$

Předposlední rovnost platí podle 4.1.9.

$$f(x) = \sqrt{1-x^2}, I = [-1, 1], \varphi(t) = \sin t, J = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}].$$

4.1.14 Integrace racionálních funkcí

V rozkladu racionální funkce na parciální zlomky (viz 1.4.15) se vyskytují zlomky tvaru

$$\frac{p}{(x-\alpha)^m} \text{ a } \frac{cx+d}{[(x-a)^2+b^2]^n}.$$

$$\int \frac{dx}{(x-\alpha)^m} = \int \frac{dt}{t^m} = \begin{cases} \frac{1}{1-m} \frac{1}{t^{m-1}} = \frac{1}{1-m} \frac{1}{(x-\alpha)^{m-1}}, & m \neq 1 \\ \ln |t| = \ln |x-\alpha|, & m = 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} x-\alpha &= t \\ dx &= dt \end{aligned}$$

$$\frac{cx+d}{[(x-a)^2+b^2]^n} = \frac{c}{2} \frac{2(x-a)}{[(x-a)^2+b^2]^n} + \frac{ac+d}{[(x-a)^2+b^2]^n}$$

$$\int \frac{2(x-a)}{[(x-a)^2+b^2]^n} dx = \int \frac{dt}{t^n} = \begin{cases} \frac{1}{1-n} \frac{1}{t^{n-1}} = \frac{1}{1-n} \frac{1}{((x-a)^2+b^2)^{n-1}}, & n \neq 1 \\ \ln |t| = \ln |(x-a)^2+b^2|, & n = 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} (x-a)^2+b^2 &= t \\ 2(x-a)dx &= dt \end{aligned}$$

$$\int \frac{dx}{[(x-a)^2+b^2]^n} = \int \frac{bdt}{(b^2t^2+b^2)^n} = \frac{1}{b^{2n-1}} \int \frac{dt}{(t^2+1)^n}$$

$$\begin{aligned} x-a &= bt \\ dx &= bdt \end{aligned}$$

Označme $K_n = \int \frac{dt}{(t^2+1)^n}$. Pak

$$K_1 = \int \frac{dt}{t^2+1} = \operatorname{arctg} t$$

$$K_n = \int \frac{dt}{(t^2+1)^n} = \frac{t}{(t^2+1)^n} + 2n \int \frac{t^2}{(t^2+1)^{n+1}} dt =$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{(t^2+1)^n} & u' &= \frac{-2nt}{(t^2+1)^{n+1}} \\ v' &= 1 & v &= t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{t}{(t^2+1)^n} + 2n \left(\int \frac{dt}{(t^2+1)^n} - \int \frac{dt}{(t^2+1)^{n+1}} \right) = \\ &= \frac{t}{(t^2+1)^n} + 2n(K_n - K_{n+1}) \end{aligned}$$

Tedy $K_n = \frac{t}{(t^2+1)^n} + 2nK_n - 2nK_{n+1}$. Odtud $K_{n+1} = \frac{t}{2n(t^2+1)^n} + \frac{2n-1}{2n}K_n$.

Neboli (píšeme-li $n-1$ místo n)

$$K_n = \frac{t}{2(n-1)(t^2+1)^{n-1}} + \frac{2n-3}{2n-2}K_{n-1}$$

4.1.15 Poznámka

Je-li R racionální funkce pak následující integrály lze transformovat na integrály z racionální funkce:

- $\int R(u(x))u'(x)dx$, kde u je libovolná funkce — substituce $u(x) = t$
- $\int R(e^{ax})dx$ — substituce $e^{ax} = t$

4.1.16 Definice

Polynom ve dvou proměnných je funkce $P : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ tvaru

$$P(x, y) = a_{n,0}x^n + a_{n-1,1}x^{n-1}y + a_{n-2,2}x^{n-2}y^2 + \dots + a_{0,n}y^n + \dots + a_{2,0}x^2 + a_{1,1}xy + a_{0,2}y^2 + a_{1,0}x + a_{0,1}y + a_{0,0}.$$

Racionální funkce ve dvou proměnných je funkce $R : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ tvaru

$$R(x, y) = \frac{P(x, y)}{Q(x, y)},$$

kde P, Q jsou polynomy ve dvou proměnných.

4.1.17 Integrály, které lze transformovat na integrály z racionální funkce

Symbolem $R(x, y)$ budeme značit racionální funkci ve dvou proměnných x, y .

1. $\int R\left(x, \sqrt[n]{\frac{ax+b}{cx+d}}\right) dx$ — substituce $\frac{ax+b}{cx+d} = t^n$.

2. $\int R(x, \sqrt{ax^2+bx+c}) dx$ (Eulerovy substituce)

$$a > 0 : \quad \pm\sqrt{ax^2+bx+c} = \pm\sqrt{a}x + t$$

$$c > 0 : \quad \pm\sqrt{ax^2+bx+c} = xt \pm \sqrt{c}$$

$$ax^2+bx+c = a(x-\alpha_1)(x-\alpha_2) : \quad \pm\sqrt{ax^2+bx+c} = t(x-\alpha_1)$$

3. Binomické integrály $\int x^m(a+bx^n)^p dx$, kde $m, n, p \in \mathbb{Q}$.

$$p \in \mathbb{Z} : \quad x = t^N, \text{ kde } N \text{ je společný jmenovatel čísel } m \text{ a } n$$

$$\frac{m+1}{n} \in \mathbb{Z} : \quad a+bx^n = t^N, \text{ kde } N \text{ je jmenovatel zlomku } p$$

$$\frac{m+1}{n} + p \in \mathbb{Z} : \quad \frac{a}{x^n} + b = t^N, \text{ kde } N \text{ je jmenovatel zlomku } p$$

4. $\int R(\sin x, \cos x)dx$ — substituce $\operatorname{tg} \frac{x}{2} = t$

V některých případech lze volit jednodušší substituci:

$$R(\sin x, -\cos x) = -R(\sin x, \cos x) : \quad \sin x = t$$

$$R(-\sin x, \cos x) = -R(\sin x, \cos x) : \quad \cos x = t$$

$$R(-\sin x, -\cos x) = R(\sin x, \cos x) : \quad \operatorname{tg} x = t$$

4.1.18 Poznámka

Primitivní funkce k funkci elementární nemusí být elementární, může být tzv. *vyšší funkcí*. Vyššími funkcemi jsou zejména

$$\int \frac{\sin x}{x} dx = Si(x) \quad \text{„integrálsinus“} \quad \int \frac{\cos x}{x} dx = Ci(x) \quad \text{„integrálcosinus“}$$

$$\int \frac{dx}{\ln x} = Li(x) \quad \text{„logaritmusintegrál“} \quad \int e^{-x^2} dx \quad \text{Gaussova funkce}$$

$$\int \sin x^2 dx, \int \cos x^2 dx \quad \text{Fresnelovy integrály}$$

Binomické integrály $\int x^m(a+bx^n)^p dx$, pokud žádné z čísel $p, \frac{m+1}{n}, \frac{m+1}{n} + p$ není celé.

Není známo obecné pravidlo, které by umožnilo rozhodnout, zda primitivní funkci neumíme vyjádřit jako elementární v důsledku nevhodných integračních metod, nebo zda skutečně vyjadřuje vyšší funkci.

4.2 Cvičení

Najděte primitivní funkci

$$\begin{array}{lll} 1) \int \left(\frac{1-x}{x}\right)^2 dx, & 2) \int \frac{(1-x)^3}{x\sqrt[3]{x}} dx, & 3) \int \frac{x^2}{1-x^2} dx, \\ 4) \int \frac{\sqrt{1+x^2} + \sqrt{1-x^2}}{\sqrt{1-x^4}} dx, & 5) \int \frac{2^{x+1} - 5^{x-1}}{10^x} dx, & 6) \int \frac{e^{3x} + 1}{e^x + 1} dx, \\ 7) \int \sqrt{1 - \sin 2x} dx, & 8) \int \operatorname{tg}^2 x dx, & 9) \int \frac{dx}{\sqrt{(5x-2)^5}}, \\ 10) \int \frac{dx}{\sqrt{3x^2-2}}, & 11) \int \frac{dx}{1+\cos x}, & 12) \int \frac{dx}{1+\sin x}, \\ 13) \int \frac{x^3 dx}{x^8-2}, & 14) \int \frac{dx}{(1+x)\sqrt{x}}, & 15) \int \frac{1}{x^2} \sin \frac{1}{x} dx, \\ 16) \int \operatorname{tg} x dx, & 17) \int \frac{dx}{e^x + e^{-x}}, & 18) \int \frac{dx}{\sqrt{1+e^{2x}}}, \\ 19) \int x^n \ln x dx, & 20) \int x^2 \sin 2x dx, & 21) \int \sin x \ln(\operatorname{tg} x) dx, \\ 22) \int \operatorname{arctg} x dx, & 23) \int \frac{1-\sqrt{x+1}}{1+\sqrt[3]{x+1}} dx, & 24) \int \frac{dx}{1+\sqrt{x}+\sqrt{1+x}}, \\ 25) \int \frac{dx}{(1-x)^2\sqrt{1-x^2}}, & 26) \int \frac{dx}{x^3\sqrt{x^2+1}}, & 27) \int \frac{dx}{x+\sqrt{x^2+x+1}}, \\ 28) \int \cos^5 x dx, & 29) \int \sin 5x \cos x dx, & 30) \int \frac{dx}{(2+\cos x)\sin x}, \\ 31) \int \frac{dx}{2\sin x - \cos x + 5}, & 32) \int \frac{dx}{(a\sin x + b\cos x)^2}, & 33) \int \frac{x dx}{\sqrt{1+\sqrt[3]{x^2}}}. \end{array}$$

Výsledky:

$$\begin{array}{l} 1) x - \frac{1}{x} - \ln x^2 \quad 2) -\frac{3}{\sqrt[3]{x}} \left(1 + \frac{3}{2}x - \frac{3}{5}x^2 + \frac{1}{8}x^3\right) \quad 3) \frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right| - x \quad 4) \arcsin x + \ln |x + \sqrt{1+x^2}| \quad 5) \frac{1}{5 \ln 2} \left(\frac{1}{2}\right)^x - \frac{2}{\ln 5} \left(\frac{1}{5}\right)^x \quad 6) \frac{1}{2} e^{2x} - e^x + x \quad 7) \operatorname{sgn} \left(x - \frac{\pi}{4}\right) (\sin x - \cos x) \quad 8) \operatorname{tg} x - x \quad 9) \frac{2}{(30-75x)\sqrt{5x-2}} \quad 10) \frac{1}{\sqrt{3}} \ln |\sqrt{3}x - \sqrt{3x^2-2}| \quad 11) \operatorname{tg} \frac{x}{2} \quad 12) \operatorname{tg} \left(\frac{x}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad 13) \frac{\sqrt{2}}{16} \ln \left| \frac{x^4 - \sqrt{2}}{x^4 + \sqrt{2}} \right| \quad 14) 2 \operatorname{arctg} \sqrt{x} \quad 15) \cos \frac{1}{x} \quad 16) -\ln |\cos x| \quad 17) \operatorname{arctg} e^x \quad 18) \ln (\sqrt{1+e^{2x}} - 1) - x \quad 19) \frac{x^{n+1}}{n+1} \ln x - \frac{x^{n+1}}{(n+1)^2} \quad 20) x \sin x \cos x - \frac{2x^2-1}{4} \cos 2x \quad 21) \ln |\operatorname{tg} \frac{x}{2}| - \cos x \ln(\operatorname{tg} x) \quad 22) x \operatorname{arctg} x - \ln \sqrt{1+x^2} \quad 23) -\frac{6}{7}t^7 + \frac{6}{5}t^5 + \frac{3}{2}t^4 - 2t^3 - 3t^2 + 6t + 3 \ln(t^2+1) - 6 \operatorname{arctg} t, \text{ kde } t = \sqrt{x+1} \quad 24) \sqrt{x} - \frac{x-\sqrt{x(1+x)}}{2} - \frac{1}{2} \ln (\sqrt{x} + \sqrt{1+x}) \quad 25) \frac{2-x}{3(1-x)^2} \sqrt{1-x^2} \quad 26) \frac{\sqrt{x^2+1}}{2x^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+\sqrt{x^2+1}}{|x|} \quad 27) \frac{3}{2+4t} + \frac{1}{2} \ln \frac{t^4}{|1+2t|^3}, \text{ kde } t = x + \sqrt{x^2+x+1} \quad 28) \sin x - \frac{2}{3} \sin^3 x + \frac{1}{5} \sin^5 x \quad 29) -\frac{1}{8} \cos 4x - \frac{1}{12} \cos 6x \quad 30) \frac{1}{6} \ln \frac{(1-\cos x)(2+\cos x)^2}{(1+\cos x)^3} \quad 31) \frac{1}{\sqrt{5}} \operatorname{arctg} \frac{3 \operatorname{tg} \frac{x}{5} + 1}{\sqrt{5}} \quad 32) \frac{-\cos x}{a(\sin x + b \cos x)} \quad 33) \frac{3}{5}t^5 - 2t^3 + 3t, \text{ kde } t = \sqrt{1 + \sqrt[3]{x^2}} \end{array}$$

4.3 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definici x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití

- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam

- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 5

Určitý Riemannův integrál

5.1 Určitý integrál

V celém tomto odstavci bude f ohraničená funkce definovaná na uzavřeném intervalu $[a, b]$.

5.1.1 Definice

Dělení uzavřeného intervalu $[a, b]$ rozumíme množinu $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ takovou, že $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$.

Čísla x_0, x_1, \dots, x_n nazýváme *dělicí body*, intervaly $[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n]$ nazýváme *dělicí intervaly* dělení D .

Číslo $\nu(D) = \max\{x_i - x_{i-1} : i = 1, 2, \dots, n\}$ nazýváme *norma* dělení D .

Symbolem $\vartheta([a, b])$ označíme množinu všech dělení intervalu $[a, b]$.

Jsou-li $D_1 \in \vartheta([a, b])$, $D_2 \in \vartheta([a, b])$ taková, že $D_1 \subseteq D_2$ (tj. každý dělicí bod D_1 je současně dělicím bodem D_2), řekneme, že dělení D_2 je *zjemněním* dělení D_1 .

5.1.2 Definice

Budte $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$, $m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$. Číslo

$$s(D, f) = \sum_{i=1}^n m_i(x_i - x_{i-1})$$

nazveme *dolním součtem* a číslo

$$S(D, f) = \sum_{i=1}^n M_i(x_i - x_{i-1})$$

nazveme *horním součtem* příslušným k funkci f a dělení D .

(Poznamenejme, že existence čísel m_i a M_i je zaručena ohraničeností funkce f .)

5.1.3 Tvzení

1. Pro libovolné $D \in \vartheta([a, b])$ platí $s(D, f) \leq S(D, f)$.

D.: plyne z toho, že $m_i \leq M_i$ a $x_i - x_{i-1} > 0$ pro $i = 1, 2, \dots, n$. \square

2. Je-li $D_2 \in \vartheta([a, b])$ zjemněním $D_1 \in \vartheta([a, b])$, pak $s(D_1, f) \leq s(D_2, f)$, $S(D_1, f) \geq S(D_2, f)$.
(Při zjemnění dělení se dolní součet nezmenší a horní součet nezvětší.)

D.: Nechť D_2 má o jeden dělicí bod více, než D_1 , tj.

$$D_1 = \{x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, x_k, \dots, x_n\}, D_2 = \{x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, z, x_k, \dots, x_n\}.$$

Označme $m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $i = 1, 2, \dots, n$

$$m'_k = \inf\{f(x) : x \in [x_{k-1}, z]\},$$

$$m''_k = \inf\{f(x) : x \in [z, x_k]\}.$$

Pak zřejmě $m_k \leq m'_k$, $m_k \leq m''_k$ a tedy

$$m_k(x_k - x_{k-1}) = m_k(x_k - z) + m_k(z - x_{k-1}) \leq m''_k(x_k - z) + m'_k(z - x_{k-1}).$$

Odtud plyne

$$\begin{aligned} s(D_1, f) &= \sum_{i=1}^{k-1} m_i(x_i - x_{i-1}) + m_k(x_k - x_{k-1}) + \sum_{i=k+1}^n m_i(x_i - x_{i-1}) \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^{k-1} m_i(x_i - x_{i-1}) + m''_k(x_k - z) + m'_k(z - x_{k-1}) + \sum_{i=k+1}^n m_i(x_i - x_{i-1}) = s(D_2, f). \end{aligned}$$

Analogicky ukážeme, že $S(D_1, f) \geq S(D_2, f)$.

Pokud D_2 má o p dělicích bodů více než D_1 , ukážeme platnost tvrzení p -násobným opakováním téže úvahy. \square

3. Nechtě $m = \inf\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $M = \sup\{f(x) : x \in [a, b]\}$. Pak pro každé $D \in \vartheta([a, b])$ platí $m(b-a) \leq s(D, f) \leq S(D, f) \leq M(b-a)$.

D.: plyne z 1. a 2., neboť $\{a, b\} \in \vartheta([a, b])$ a každé jiné dělení je zjemněním $\{a, b\}$. \square

Množiny $\{s(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\}$ a $\{S(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\}$ jsou tedy ohraničené. Obě jsou zřejmě neprázdné. To podle 1.1.7(R14) znamená, že následující definice je korektní.

5.1.4 Definice

Číslo

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \sup\{s(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\}$$

nazýváme *dolní integrál funkce f na intervalu $[a, b]$* a číslo

$$\int_a^{\bar{b}} f(x)dx = \inf\{S(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\}$$

nazýváme *horní integrál funkce f na intervalu $[a, b]$* .

5.1.5 Tvrzení

Nechtě $m = \inf\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $M = \sup\{f(x) : x \in [a, b]\}$. Pak platí

$$m(b-a) \leq \int_{\bar{a}}^b f(x)dx \leq \int_a^{\bar{b}} f(x)dx \leq M(b-a).$$

D.: plyne z 5.1.3.3 a z definice 5.1.4. \square

5.1.6 Definice

Řekneme, že ohraničená funkce f je na intervalu $[a, b]$ *integrace schopna (integrovatelná, integrabilní) v Riemannově smyslu*, jestliže

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \int_a^{\bar{b}} f(x)dx.$$

V tomto případě definujeme její *Riemannův integrál*

$$\int_a^b f(x)dx = \int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \int_a^{\bar{b}} f(x)dx.$$

Jestliže

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx < \int_a^{\bar{b}} f(x)dx,$$

řekneme, že funkce f *není na intervalu* $[a, b]$ *integrace schopna v Riemannově smyslu.*

5.1.7 Příklady

1. $f(x) = c \in \mathbb{R}$ pro $x \in [a, b]$.

Pak $m = M = c$ a tedy podle 5.1.5 je

$$c(b-a) \leq \int_{\bar{a}}^b f(x)dx \leq \int_a^{\bar{b}} f(x)dx \leq c(b-a),$$

z čehož plyne

$$\int_{\bar{a}}^b f(x)dx = \int_a^{\bar{b}} f(x)dx = \int_a^b f(x)dx = c(b-a).$$

2. $f(x) = \chi(x)$ na $[0, 1]$.

$D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \vartheta([0, 1])$, $m_i = 0$, $M_i = 1$ pro každé $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Tedy

$$s(D, f) = \sum_{i=1}^n m_i(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n 0(x_i - x_{i-1}) = 0, \quad \int_{\bar{a}}^b \chi(x)dx = 0,$$

$$S(D, f) = \sum_{i=1}^n M_i(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n 1(x_i - x_{i-1}) = x_n - x_0 = 1, \quad \int_a^b f(x)dx = 1$$

a $\chi(x)$ není integrabilní na $[0, 1]$.

5.1.8 Definice

Nechť $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$, $\xi_i \in [x_{i-1}, x_i]$. Množina $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ se nazývá *výběr reprezentantů dělicích intervalů dělení* D .

Číslo

$$\sigma(D, f, \Xi) = \sum_{i=1}^n f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$$

se nazývá *integrální součet příslušný k funkci* f , *dělení* D *a výběru reprezentantů* Ξ .

Poněvadž $m_i \leq f(\xi_i) \leq M_i$, platí $s(D, f) \leq \sigma(D, f, \Xi) \leq S(D, f)$.

Posloupností v širším smyslu rozumíme zobrazení množiny \mathbb{N} do libovolné množiny.

Lze tedy mluvit o posloupnosti dělení daného intervalu: $\mathbb{N} \rightarrow \vartheta([a, b])$. Řekneme, že posloupnost dělení $\{D_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq \vartheta([a, b])$ je *nulová*, jestliže $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu(D_n) = 0$.

Ke každému $\delta > 0$ existuje $D \in \vartheta([a, b])$ takové, že $\nu(D) < \delta$. (Stačí položit $n = \left\lceil \frac{b-a}{\delta} \right\rceil + 1$ a interval $[a, b]$ rozdělit na n stejně dlouhých dělicích intervalů.)

5.1.9 Věta

Buď $\{D_n\}_{n=1}^{\infty}$ libovolná nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$. Pak platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx.$$

Je-li navíc f integrabilní na $[a, b]$ a Ξ_n je libovolný výběr representantů dělicích intervalů dělení D_n , pak platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma(D_n, f, \Xi_n) = \int_a^b f(x) dx.$$

D.: Nejdříve dokážeme pomocné tvrzení: Ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro každé $D \in \vartheta([a, b])$, $\nu(D) < \delta$ platí

$$S(D, f) < \int_a^b f(x) dx + \varepsilon.$$

Poněvadž f je ohraničená, existuje $h \in \mathbb{R}$, $h > 0$, že $|f(x)| \leq h$ pro $x \in [a, b]$. Podle 5.1.4 a podle 1.1.6(s2*) existuje $D_1 = \{y_0, y_1, \dots, y_p\} \in \vartheta([a, b])$, že

$$\int_a^b f(x) dx \leq S(D_1, f) < \int_a^b f(x) dx + \frac{\varepsilon}{2}.$$

Položme $\delta = \frac{\varepsilon}{4hp}$. Pak $\delta > 0$. Buď $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$ libovolné takové, že $\nu(D) < \delta$.

Dále položme $D_2 = D \cup D_1 = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ Podle 5.1.3.2 je $S(D_2, f) \leq S(D, f)$.

Dělicí intervaly $[x_{i-1}, x_i]$ rozdělíme do dvou druhů:

- intervaly 1. druhu, jestliže uvnitř něho neleží žádný dělicí bod y_j
- intervaly 2. druhu v opačném případě

Každý dělicí interval 1. druhu je rovněž dělicím intervalem dělení D_2 . Tento interval přispívá k $S(D, f)$ i k $S(D_2, f)$ týmž sčítancem $M_i(x_i - x_{i-1})$, tedy v rozdílu $S(D, f) - S(D_2, f)$ se neprojeví.

Uvnitř každého intervalu $[x_{i-1}, x_i]$ 2. druhu leží alespoň jedno z čísel y_1, y_2, \dots, y_{p-1} , což znamená, že intervalů 2. druhu je nejvýše $p - 1$.

Interval druhého druhu přispívá k $S(D, f)$ sčítancem $M_i(x_i - x_{i-1})$, který je v absolutní hodnotě menší nebo roven $h\nu(D) < h\delta$. Absolutní hodnota příspěvků všech intervalů 2. druhu k $S(D, f)$ je tedy $< h\delta p$.

V D_2 je každý interval $[x_{i-1}, x_i]$ 2. druhu rozdělen dělicími body $x_{i-1} = z_r < z_{r+1} < \dots < z_s = x_i$. Označme $M'_k = \sup\{f(x) : x \in [z_{k-1}, z_k]\}$. Opět $|M'_k| \leq h$ a tedy absolutní hodnota příspěvků intervalu $[x_{i-1}, x_i]$ do součtu $S(D_2, f)$ jest

$$\left| \sum_{k=r+1}^s M'_k(z_k - z_{k-1}) \right| \leq \sum_{k=r+1}^s h(z_k - z_{k-1}) = h(z_s - z_r) = h(x_i - x_{i-1}) < h\nu(D) < h\delta.$$

Absolutní hodnota příspěvků všech intervalů 2. druhu k $S(D_2, f)$ je tedy $< h\delta p$.

Odtud plyne, že $S(D, f) - S(D_2, f) < 2h\delta p = \frac{\varepsilon}{2}$, neboli $S(D, f) < S(D_2, f) + \frac{\varepsilon}{2}$.

Podle 5.1.3.2 je $S(D_2, f) \leq S(D_1, f)$ a tedy

$$S(D, f) < S(D_2, f) + \frac{\varepsilon}{2} \leq S(D_1, f) + \frac{\varepsilon}{2} < \int_a^b f(x) dx + \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2},$$

což je pomocné tvrzení.

Bud' nyní $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle pomocného tvrzení existuje $\delta \in \mathbb{R}$, $\delta > 0$ takové, že pro každé $D \in \mathcal{D}([a, b])$, $\nu(D) < \delta$ platí

$$S(D, f) < \int_a^b f(x) dx + \varepsilon.$$

Poněvadž

$$S(D, f) \geq \int_a^b f(x) dx,$$

platí

$$\left| S(D, f) - \int_a^b f(x) dx \right| < \varepsilon.$$

Poněvadž posloupnost $\{D_n\}$ je nulová, k $\delta > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ platí $\nu(D_n) < \delta$. To znamená, že pro $n \geq n_0$ platí

$$\left| S(D_n, f) - \int_a^b f(x) dx \right| < \varepsilon,$$

neboli

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx.$$

Analogicky dokážeme

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx.$$

Je-li f integrabilní na $[a, b]$, je

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx,$$

takže

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx.$$

Poslední tvrzení věty nyní plyne z nerovnosti $s(D, f) \leq \sigma(D, f, \Xi) \leq S(D, f)$ a z 1.3.7. \square

5.1.10 Věta (Nutná a dostatečná podmínka integrability)

Funkce f je na $[a, b]$ integrabilní právě tehdy, když ke každému $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ existuje $D \in \mathcal{D}([a, b])$ takové, že $S(D, f) - s(D, f) < \varepsilon$.

D.: \Rightarrow : Nechť f je integrabilní. Budte $\varepsilon > 0$ libovolné a $\{D_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq \mathcal{D}([a, b])$ libovolná nulová. Podle 5.1.9 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že

$$\left| s(D_{n_0}, f) - \int_a^b f(x) dx \right| < \frac{\varepsilon}{2}, \quad \left| S(D_{n_0}, f) - \int_a^b f(x) dx \right| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Tedy pro D_{n_0} platí

$$\begin{aligned} S(D_{n_0}, f) - s(D_{n_0}, f) &= |S(D_{n_0}, f) - s(D_{n_0}, f)| \leq \\ &\leq \left| S(D_n, f) - \int_a^b f(x) dx \right| + \left| \int_a^b f(x) dx - s(D_n, f) \right| < \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

\Leftarrow : Necht' je podmínka splněna. Buď $\varepsilon > 0$ a $D \in \mathcal{D}([a, b])$ takové dělení, že $S(D, f) - s(D, f) < \varepsilon$. Protože

$$\int_a^b f(x) dx \leq S(D, f), \quad \int_a^b f(x) dx \geq s(D, f),$$

platí

$$\int_a^b f(x) dx - \int_a^b f(x) dx < \varepsilon.$$

Poněvadž ε je libovolné, je možno poslední nerovnost splnit pouze tehdy, když

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b f(x) dx.$$

Poněvadž opačná nerovnost platí podle 5.1.5 vždy, jest

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(x) dx$$

a f je integrabilní. \square

5.1.11 Věta

Je-li funkce f monotónní na $[a, b]$, pak je na tomto intervalu integrabilní.

D.: Necht' pro určitost je f na $[a, b]$ neklesající.

Je-li $f(a) = f(b)$, je f na $[a, b]$ konstantní a podle 5.1.7.1 je integrabilní.

Necht' $f(a) < f(b)$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné a $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \mathcal{D}([a, b])$ takové, že $\nu(D) < \frac{\varepsilon}{f(b) - f(a)}$.
 $m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\} = f(x_{i-1})$, $M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\} = f(x_i)$, tedy

$$\begin{aligned} S(D, f) - s(D, f) &= \sum_{i=1}^n f(x_i)(x_i - x_{i-1}) - \sum_{i=1}^n f(x_{i-1})(x_i - x_{i-1}) = \\ &= \sum_{i=1}^n (f(x_i) - f(x_{i-1}))(x_i - x_{i-1}) \leq \sum_{i=1}^n (f(x_i) - f(x_{i-1}))\nu(D) = \\ &= \nu(D)(f(x_1) - f(x_0) + f(x_2) - f(x_1) + \dots + f(x_n) - f(x_{n-1})) = \\ &= \nu(D)(f(x_n) - f(x_0)) = \nu(D)(f(b) - f(a)) < \frac{\varepsilon}{f(b) - f(a)}(f(b) - f(a)) = \\ &= \varepsilon. \end{aligned}$$

Podle 5.1.10 je f integrabilní na $[a, b]$. \square

5.1.12 Věta

Je-li funkce f spojitá na $[a, b]$, pak je na tomto intervalu integrabilní.

D.: Buď f spojitá a $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 2.2.20 je f na $[a, b]$ spojitá stejnoměrně, tedy k $\frac{\varepsilon}{b-a} > 0$ existuje

$$\delta > 0 \text{ takové, že pro } x, y \in [a, b], |x - y| < \delta \text{ je } |f(x) - f(y)| < \frac{\varepsilon}{b-a}.$$

Buď $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$, $\nu(D) < \delta$,

$$m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\},$$

$$M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}.$$

Podle 2.2.12 existují $y_i \in [x_{i-1}, x_i]$, $z_i \in [x_{i-1}, x_i]$ takové, že $f(y_i) = m_i$, $f(z_i) = M_i$.

Dále $|y_i - z_i| < \delta$ a tedy $f(z_i) - f(y_i) = M_i - m_i < \frac{\varepsilon}{b-a}$. Odtud

$$\begin{aligned} S(D, f) - s(D, f) &= \sum_{i=1}^n f(z_i)(x_i - x_{i-1}) - \sum_{i=1}^n f(y_i)(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n (f(z_i) - f(y_i))(x_i - x_{i-1}) < \\ &< \frac{\varepsilon}{b-a} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) = \frac{\varepsilon}{b-a} (b-a) = \varepsilon \end{aligned}$$

a podle 5.1.10 je f integrabilní na $[a, b]$. \square

5.1.13 Definice

Množina $M \subseteq \mathbb{R}$ se nazývá *nulová*, jestliže ke každému $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ existuje konečný počet otevřených intervalů $(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_n, b_n)$ takových, že $\sum_{i=1}^n (b_i - a_i) < \varepsilon$ a $M \subseteq (a_1, b_1) \cup (a_2, b_2) \cup \dots \cup (a_n, b_n)$.

Platí

- Každá konečná množina je nulová.
- Sjednocení konečně mnoha nulových množin je nulová množina.
- Množina členů konvergentní posloupnosti je nulová.
- Množina členů posloupnosti, která má konečný počet hromadných bodů, je nulová.

5.1.14 Věta

Je-li množina bodů nespojitosti funkce f na intervalu $[a, b]$ nulová, pak je f integrabilní na $[a, b]$.

D.: Bude proveden později (5.2.15). \square

Příklad: $[a, b] = [0, 1]$, $f(x) = \begin{cases} (-1)^n, & x \in \left(\frac{1}{2^{n+1}}, \frac{1}{2^n}\right], n = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & x = 0 \end{cases}$.

Množina bodů nespojitosti $M = \left\{\frac{1}{2^n} : n \in \mathbb{N}\right\}$ tvoří konvergentní posloupnost. Je to tedy nulová množina, což znamená, že f je integrabilní na $[0, 1]$. (Platí $\int_a^b f(x)dx = \frac{1}{3}$.)

5.1.15 Věta (Leibnizova [1646 – 1716] – Newtonova [1642 – 1727] formule)

Nechť funkce f je integrabilní na $[a, b]$ a nechť funkce F je spojitá na $[a, b]$ a na (a, b) primitivní k f . Pak

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).$$

D.: Buď $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$. F splňuje na $[x_{i-1}, x_i]$ předpoklady 2.5.3. Existuje tedy $\xi_i \in (x_{i-1}, x_i)$ takové, že $F(x_i) - F(x_{i-1}) = F'(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) = f(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$.
Označme $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$. Pak

$$\sigma(D, f, \Xi) = \sum_{i=1}^n f(\xi_i)(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^n (F(x_i) - F(x_{i-1})) = F(b) - F(a).$$

To znamená: Pro libovolné $D \in \vartheta([a, b])$ existuje výběr reprezentantů Ξ takový, že $\sigma(D, f, \Xi) = F(b) - F(a)$.
Buď nyní $\{D_n\}_{n=1}^\infty$ libovolná nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$. Ke každému D_n existuje výběr reprezentantů Ξ_n takový, že $\sigma(D_n, f, \Xi_n) = F(b) - F(a)$. Podle 5.1.9 je

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma(D_n, f, \Xi_n) = F(b) - F(a).$$

□

Budeme používat označení $[F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$.

5.1.16 Poznámka

Je-li funkce G spojitá na $[a, b]$ a na (a, b) primitivní k f , pak podle 4.1.5 je $G(x) = F(x) + c$ a tedy

$$[G(x)]_a^b = [F(x) + c]_a^b = (F(b) + c) - (F(a) + c) = F(b) - F(a) = [F(x)]_a^b.$$

To znamená, že formule z věty 5.1.15 nezávisí na výběru primitivní funkce.

5.1.17 Příklad

$$\int_0^1 x^2 \operatorname{arctg} x dx$$

$x^2 \operatorname{arctg} x$ je na $[0, 1]$ spojitá, tedy podle 5.1.12 integrabilní.

$\frac{x^3}{3} \operatorname{arctg} x + \frac{1}{6} \ln(x^2 + 1) - \frac{x^2}{6}$ je primitivní k $x^2 \operatorname{arctg} x$ a na $[0, 1]$ spojitá. Tedy

$$\begin{aligned} \int_0^1 x^2 \operatorname{arctg} x dx &= \left[\frac{x^3}{3} \operatorname{arctg} x + \frac{1}{6} \ln(x^2 + 1) - \frac{x^2}{6} \right]_0^1 = \frac{1}{3} \operatorname{arctg} 1 + \frac{1}{6} \ln 2 - \frac{1}{6} - \frac{1}{6} \ln 1 = \\ &= \frac{1}{3} \frac{\pi}{4} + \frac{1}{6} \ln 2 - \frac{1}{6} = \frac{1}{12} (\pi - 2 + \ln 2). \end{aligned}$$

5.1.18 Definice

Řekneme, že funkce f definovaná na (a, b) je na tomto intervalu *integrace schopná* (*integrovatelná*, *integrabilní*) v *Newtonově smyslu*, jestliže existuje funkce F spojitá na $[a, b]$ a primitivní k f na (a, b) .

V tomto případě definujeme její *Newtonův integrál*

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a).$$

Věta 5.1.15 říká, že je-li funkce f integrabilní na $[a, b]$ v Riemannově i v Newtonově smyslu, pak se její Riemannův a Newtonův integrál rovnají.

5.1.19 Poznámky

1. Integrace „per partes“ pro určité integrály:

$$\int_a^b u(x)v'(x)dx = [u(x)v(x)]_a^b - \int_a^b u'(x)v(x)dx$$

2. Substituční metoda pro určité integrály:

$$\int_a^b f(\varphi(x))\varphi'(x)dx = \int_{\varphi(a)}^{\varphi(b)} f(t)dt$$

$$\int_a^b f(x)dx = \int_{\varphi^{-1}(a)}^{\varphi^{-1}(b)} f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$$

5.2 Vlastnosti Riemannova integrálu

V celém odstavci bude pojem „integrabilní funkce“ znamenat funkci integrace schopnou v Riemannově smyslu.

5.2.1 Věta

Nechť f je funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$, $c, d \in \mathbb{R}$, $c \leq f(x) \leq d$ pro každé $x \in [a, b]$. Pak

$$c(b-a) \leq \int_a^b f(x)dx \leq d(b-a).$$

D.: Plyne z 5.1.5, neboť $c \leq \inf\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $d \geq \sup\{f(x) : x \in [a, b]\}$. \square

5.2.2 Důsledky

1. Nechť f je funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$. Jestliže $f(x) \geq 0$ pro každé $x \in [a, b]$, pak

$$\int_a^b f(x)dx \geq 0.$$

2. Nechť f je funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$. Jestliže $|f(x)| \leq c$ pro každé $x \in [a, b]$, pak

$$\left| \int_a^b f(x)dx \right| \leq c(b-a).$$

D.: Plyne z nerovnosti $-c(b-a) \leq \int_a^b f(x)dx \leq c(b-a)$. \square

5.2.3 Věta (aditivita vzhledem k integrovaným funkcím)

Nechť f a g jsou funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$. Pak je i funkce $f + g$ integrabilní na intervalu $[a, b]$ a platí

$$\int_a^b (f(x) + g(x))dx = \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx.$$

D.: Buď $D = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$ libovolné a označme
 $m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $n_i = \inf\{g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $p_i = \inf\{f(x) + g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$.
 Na intervalu $[x_{i-1}, x_i]$ platí $m_i + n_i \leq f(x) + g(x)$ a tedy $m_i + n_i \leq p_i$, což znamená, že
 $m_i(x_i - x_{i-1}) + n_i(x_i - x_{i-1}) \leq p_i(x_i - x_{i-1})$.
 Sečtením těchto nerovností pro i od 1 do n dostaneme $s(D, f) + s(D, g) \leq s(D, f + g)$.
 Buď nyní $\{D_n\}_{n=0}^\infty$ libovolná nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$. Pak platí
 $s(D_n, f) + s(D_n, g) \leq s(D_n, f + g)$ a limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ dostaneme podle 5.1.9, 1.3.5.1 a 1.3.6.2

$$\int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx \leq \int_a^b (f(x) + g(x))dx.$$

Analogicky odvodíme

$$\int_a^b (f(x) + g(x))dx \leq \int_a^b f(x)dx + \int_a^b g(x)dx.$$

Z těchto nerovností plyne tvrzení. \square

5.2.4 Věta (homogenita vzhledem k integrovaným funkcím)

Nechť f je funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$ a $c \in \mathbb{R}$. Pak funkce cf je integrabilní na intervalu $[a, b]$ a platí

$$\int_a^b cf(x)dx = c \int_a^b f(x)dx.$$

D.: Nechť $D = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \vartheta([a, b])$ libovolné a označme

$$m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \quad M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \\ n_i = \inf\{cf(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \quad N_i = \sup\{cf(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}.$$

Pro $c = 0$ je tvrzení zřejmé.

Nechť $c > 0$. Pak je $n_i = cm_i$, $N_i = cM_i$ a tedy $s(D, cf) = cs(D, f)$, $S(D, cf) = cS(D, f)$.

Pro libovolnou nulovou $\{D_n\}_{n=1}^\infty \subseteq \vartheta([a, b])$ platí:

$$\int_a^b cf(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, cf) = c \lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = c \int_a^b f(x)dx, \\ \int_a^b cf(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, cf) = c \lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f) = c \int_a^b f(x)dx,$$

z čehož plyne tvrzení.

Nechť $c < 0$. Pak $n_i = cM_i$, $N_i = cm_i$ a tedy $s(D, cf) = cS(D, f)$, $S(D, cf) = cs(D, f)$ a důkaz dokončíme s využitím nulové posloupnosti $\{D_n\}_{n=1}^\infty \subseteq \vartheta([a, b])$. \square

5.2.5 Důsledek (linearita Riemannova integrálu)

Nechť f_1, f_2, \dots, f_n jsou funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$ a $c_1, c_2, \dots, c_n \in \mathbb{R}$. Pak je funkce $c_1f_1 + c_2f_2 + \dots + c_nf_n$ integrabilní na intervalu $[a, b]$ a platí

$$\int_a^b (c_1f_1(x) + c_2f_2(x) + \dots + c_nf_n(x))dx = c_1 \int_a^b f_1(x)dx + c_2 \int_a^b f_2(x)dx + \dots + c_n \int_a^b f_n(x)dx.$$

5.2.6 Věta (monotonie vzhledem k integrovaným funkcím)

Nechť f a g jsou funkce integrabilní na intervalu $[a, b]$. Jestliže pro každé $x \in [a, b]$ platí $f(x) \leq g(x)$, pak

$$\int_a^b f(x)dx \leq \int_a^b g(x)dx.$$

D.: Pro $x \in [a, b]$ je $g(x) - f(x) \geq 0$ a tedy podle 5.2.2.1 a 5.2.5 je

$$0 \leq \int_a^b (g(x) - f(x))dx = \int_a^b g(x)dx - \int_a^b f(x)dx. \quad \square$$

5.2.7 Věta

Nechť funkce f a g jsou integrabilní na intervalu $[a, b]$. Pak je také funkce fg integrabilní na intervalu $[a, b]$.

D.: Nechť nejprve $f(x) \geq 0$, $g(x) \geq 0$ pro $x \in [a, b]$.

Poněvadž funkce f a g jsou integrabilní, jsou ohraničené a tedy existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$ takové, že $f(x) \leq k$, $g(x) \leq k$ pro $x \in [a, b]$.

Bud' $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné. K číslu $\frac{\varepsilon}{2k} > 0$ existují podle 5.1.10 dělení D_1 , D_2 intervalu $[a, b]$ taková, že

$$S(D_1, f) - s(D_1, f) < \frac{\varepsilon}{2k}, \quad S(D_2, g) - s(D_2, g) < \frac{\varepsilon}{2k}.$$

Položme $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} = D_1 \cup D_2$.

Podle 5.1.3.2 platí $s(D_1, f) \leq s(D, f)$, $S(D_1, f) \geq S(D, f)$ a tedy

$$S(D, f) - s(D, f) \leq S(D_1, f) - s(D_1, f) < \frac{\varepsilon}{2k}.$$

Obdobně: $S(D, g) - s(D, g) < \frac{\varepsilon}{2k}$.

Označme

$$\begin{aligned} m_i &= \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, & M_i &= \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \\ n_i &= \inf\{g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, & N_i &= \sup\{g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \\ p_i &= \inf\{f(x)g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, & P_i &= \sup\{f(x)g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}. \end{aligned}$$

Na intervalu $[x_{i-1}, x_i]$ platí $0 \leq m_i \leq f(x) \leq M_i$, $0 \leq n_i \leq g(x) \leq N_i$ a tedy $m_i n_i \leq f(x)g(x) \leq M_i N_i$. Odtud dále plyne $m_i n_i \leq p_i \leq P_i \leq M_i N_i$, neboli $P_i - p_i \leq M_i N_i - m_i n_i = N_i(M_i - m_i) + m_i(N_i - n_i)$. Poněvadž $N_i \leq k$, $m_i \leq k$, platí $P_i - p_i \leq k((M_i - m_i) + (N_i - n_i))$. Poslední nerovnost vynásobíme $(x_i - x_{i-1})$ a takto vzniklé nerovnosti sečteme pro $i = 1, 2, \dots, n$. Dostaneme:

$$S(D, fg) - s(D, fg) \leq k(S(D, f) - s(D, f) + S(D, g) - s(D, g)) \leq k\left(\frac{\varepsilon}{2k} + \frac{\varepsilon}{2k}\right) = \varepsilon.$$

Podle 5.1.10 je funkce fg integrabilní.

Nechť nyní jsou f , g libovolné. Opět existuje $k \in \mathbb{R}$, že $f(x) \leq k$, $g(x) \leq k$ pro $x \in [a, b]$.

Podle 5.2.5 jsou funkce $k - f(x) \geq 0$, $k - g(x) \geq 0$ integrabilní a podle první části důkazu je integrabilní i funkce $h(x) = (k - f(x))(k - g(x))$.

Poněvadž $f(x)g(x) = h(x) + kf(x) + kg(x) - k^2$, je funkce fg podle 5.2.5 integrabilní na intervalu $[a, b]$. \square

5.2.8 Věta

Nechť funkce f a g jsou integrabilní na intervalu $[a, b]$. Je-li $|g(x)| \geq c > 0$ pro $x \in [a, b]$, pak je také funkce $\frac{f}{g}$ integrabilní na intervalu $[a, b]$.

D.: Nechť $g(x) \geq c > 0$ pro $x \in [a, b]$.

Bud' $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné. K číslu $c^2\varepsilon > 0$ existuje podle 5.1.10 takové $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \mathcal{D}([a, b])$, že $S(D, g) - s(D, g) < c^2\varepsilon$.

Označme

$$\begin{aligned} m_i &= \inf\{g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, & M_i &= \sup\{g(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \\ n_i &= \inf\left\{\frac{1}{g(x)} : x \in [x_{i-1}, x_i]\right\}, & N_i &= \sup\left\{\frac{1}{g(x)} : x \in [x_{i-1}, x_i]\right\}. \end{aligned}$$

Platí $n_i = \frac{1}{M_i}$, $N_i = \frac{1}{m_i}$, $m_i \geq c$, $M_i \geq c$. Odtud dostaneme

$$N_i - n_i = \frac{1}{m_i} - \frac{1}{M_i} = \frac{M_i - m_i}{m_i M_i} \leq \frac{1}{c^2} (M_i - m_i).$$

Tyto nerovnice vynásobíme $(x_i - x_{i-1})$ a sečteme pro $i = 1, 2, \dots, n$. Dostaneme

$$S\left(D, \frac{1}{g}\right) - s\left(D, \frac{1}{g}\right) \leq \frac{1}{c^2} (S(D, g) - s(D, g)) < \varepsilon.$$

Podle 5.1.10 je funkce $\frac{1}{g}$ integrabilní na $[a, b]$.

Je-li $g(x) \leq -c < 0$ pro $x \in [a, b]$, je podle první části důkazu funkce $-\frac{1}{g}$ integrabilní na $[a, b]$ a tedy podle 5.2.4 je také $\frac{1}{g}$ integrabilní na $[a, b]$.

Tvrzení věty je nyní důsledkem 5.2.7, neboť $\frac{f}{g} = f \frac{1}{g}$. \square

Poznámka: Předpoklad $|g(x)| \geq c > 0$ nelze obecně nahradit slabším předpokladem $|g(x)| > 0$, neboť v takovém případě funkce $\frac{f}{g}$ nemusí být ohraničená.

Např.: $[a, b] = [0, 1]$, $f(x) = 1$, $g(x) = \begin{cases} x, & x \in (0, 1] \\ 1, & x = 0 \end{cases}$.

g je integrabilní na $[0, 1]$ podle 5.1.14, $\frac{f(x)}{g(x)} = \begin{cases} \frac{1}{x}, & x \in (0, 1] \\ 1, & x = 0 \end{cases}$ není ohraničená.

5.2.9 Věta

Je-li funkce f integrabilní na intervalu $[a, b]$, pak také funkce $|f|$ je integrabilní na intervalu $[a, b]$ a platí

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| dx.$$

D.: Buď $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $D = \{x_0, x_1, \dots, x_n\} \in \mathcal{D}([a, b])$ takové, že $S(D, f) - s(D, f) < \varepsilon$. Označme

$$m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \quad M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \\ n_i = \inf\{|f(x)| : x \in [x_{i-1}, x_i]\}, \quad N_i = \sup\{|f(x)| : x \in [x_{i-1}, x_i]\}.$$

Buďte $x, y \in [x_{i-1}, x_i]$. Pak $|f(x)| - |f(y)| \leq |f(x) - f(y)| \leq M_i - m_i$. Odtud plyne, že pro pevně zvolené y je $|f(x)| \leq |f(y)| + M_i - m_i$. Z vlastností suprema plyne $N_i \leq |f(y)| + M_i - m_i$, neboli $|f(y)| \geq N_i - (M_i - m_i)$. Z vlastností infima nyní plyne $n_i \geq N_i - (M_i - m_i)$, neboli $N_i - n_i \leq M_i - m_i$.

Poslední nerovnice vynásobíme $(x_i - x_{i-1})$ a sečteme přes $i = 1, 2, \dots, n$.

Dostaneme $S(D, |f|) - s(D, |f|) \leq S(D, f) - s(D, f) < \varepsilon$ a podle 5.1.10 je funkce $|f|$ integrabilní.

Dále pro $x \in [a, b]$ platí $f(x) \leq |f(x)|$, $-f(x) \leq |f(x)|$ a tedy podle 5.2.6

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b |f(x)| dx, \quad - \int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b |f(x)| dx,$$

což znamená

$$- \int_a^b |f(x)| dx \leq \int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b |f(x)| dx,$$

a to je nerovnost v tvrzení věty. \square

Poznámka: Obrácené tvrzení neplatí. Např. pro $f(x) = \chi(x) - \frac{1}{2}$ je $|f(x)| = \frac{1}{2}$, což je funkce integrabilní, ale

$$\int_0^1 f(x)dx = -\frac{1}{2} < \frac{1}{2} = \int_0^1 |f(x)|dx.$$

(Sr. 5.1.7)

5.2.10 Věta (1. věta o střední hodnotě integrálního počtu)

Nechť funkce f a g jsou integrabilní na intervalu $[a, b]$, $g(x) \geq 0$ pro $x \in [a, b]$, $m = \inf\{f(x) : x \in [a, b]\}$, $M = \sup\{f(x) : x \in [a, b]\}$. Pak existuje $\mu \in [m, M]$ takové, že

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = \mu \int_a^b g(x)dx.$$

D.: Poněvadž $m \leq f(x) \leq M$ a $g(x) \geq 0$, platí $mg(x) \leq f(x)g(x) \leq Mg(x)$ a tedy podle 5.2.6 a 5.2.4 je

$$m \int_a^b g(x)dx \leq \int_a^b f(x)g(x)dx \leq M \int_a^b g(x)dx.$$

Je-li $\int_a^b g(x)dx = 0$, pak podle 5.2.6 a 5.2.4 je

$$0 = m \int_a^b g(x)dx = \int_a^b mg(x)dx \leq \int_a^b f(x)g(x)dx \leq \int_a^b Mg(x)dx = M \int_a^b g(x)dx = 0$$

a tedy $\int_a^b f(x)g(x)dx = 0$. Rovnost v tvrzení věty je splněna pro libovolné $\mu \in \mathbb{R}$.

Je-li $\int_a^b g(x)dx > 0$, položíme

$$\mu = \frac{\int_a^b f(x)g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx}.$$

Pak

$$m = \frac{m \int_a^b g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx} \leq \frac{\int_a^b f(x)g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx} = \mu = \frac{\int_a^b f(x)g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx} \leq \frac{M \int_a^b g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx} = M.$$

□

5.2.11 Důsledky

1. Nechť funkce f je navíc spojitá. Pak existuje $c \in [a, b]$ takové, že

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c) \int_a^b g(x)dx.$$

D.: plyne z 2.2.15. □

2. Necht' m a M mají stejný význam jako v 5.2.10. Pak existuje $\mu \in [m, M]$ takové, že

$$\int_a^b f(x)dx = \mu(b-a).$$

D.: volbou $g(x) = 1$. \square

3. Necht' funkce f je spojitá na intervalu $[a, b]$. Pak existuje $c \in [a, b]$ takové, že

$$\int_a^b f(x)dx = f(c)(b-a).$$

5.2.12 Věta (aditivita vzhledem k integračnímu oboru)

Necht' $a, b, c \in \mathbb{R}$, $a < b < c$ a f je ohraničená funkce definovaná na $[a, c]$. Pak platí

$$\int_{\bar{a}}^c f(x)dx = \int_{\bar{a}}^b f(x)dx + \int_{\bar{b}}^c f(x)dx, \quad \int_a^{\bar{c}} f(x)dx = \int_a^{\bar{b}} f(x)dx + \int_{\bar{b}}^{\bar{c}} f(x)dx.$$

Je-li funkce f integrabilní na $[a, b]$ i na $[a, c]$, pak je integrabilní i na $[a, c]$ a platí

$$\int_a^c f(x)dx = \int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx.$$

D.: Necht' $\{D'_n\}$ je nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$ a $\{D''_n\}$ je nulová posloupnost dělení intervalu $[b, c]$. Pro každé $n \in \mathbb{N}$ položme $D_n = D'_n \cup D''_n$.

Pak je $D_n \in \vartheta([a, b])$, $\nu(D_n) = \max\{\nu(D'_n), \nu(D''_n)\}$. Tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} \nu(D_n) = 0$, neboli $\{D_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nulová posloupnost dělení intervalu $[a, c]$.

Dále $s(D_n, f) = s(D'_n, f) + s(D''_n, f)$, $S(D_n, f) = S(D'_n, f) + S(D''_n, f)$, z čehož limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ s využitím 5.1.9 dostaneme první tvrzení.

Je-li funkce f integrabilní na intervalech $[a, b]$ a $[b, c]$, platí

$$\int_{\bar{a}}^c f(x)dx = \int_a^b f(x)dx + \int_b^c f(x)dx = \int_a^{\bar{c}} f(x)dx,$$

což je druhé tvrzení. \square

5.2.13 Poznámky

1. Druhé tvrzení věty 5.2.12 neplatí pro Newtonův integrál.

Např.: $a = -1$, $b = 0$, $c = 1$, $f(x) = \operatorname{sgn} x$.

2. Větu 5.2.12 lze indukci zobecnit na libovolný konečný počet intervalů:

Jsou-li $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ taková, že $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ a funkce f je integrabilní na každém intervalu $[a_{i-1}, a_i]$, $i = 2, 3, \dots, n$, pak je f integrabilní i na intervalu $[a_1, a_n]$ a platí

$$\int_{a_1}^{a_n} f(x)dx = \sum_{i=2}^n \int_{a_{i-1}}^{a_i} f(x)dx.$$

Analogické tvrzení platí pro horní a dolní integrál.

5.2.14 Věta (monotonie vzhledem k integračnímu oboru)

Nechť funkce f je integrabilní na intervalu $[a, b]$ a necht' $[c, d] \subseteq (a, b)$. Pak je f integrabilní i na intervalu $[c, d]$.

D.: Necht' $\{D'_n\}$, resp. $\{D''_n\}$, resp. $\{D'''_n\}$ je nulová posloupnost dělení intervalu $[a, c]$, resp. $[c, d]$, resp. $[d, b]$.

Pro každé $n \in \mathbb{N}$ položme $D_n = D'_n \cup D''_n \cup D'''_n$.

Pak je $\{D_n\}_{n=1}^\infty$ nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$ a platí

$$s(D_n, f) = s(D'_n, f) + s(D''_n) + s(D'''_n), \quad S(D_n, f) = S(D'_n, f) + S(D''_n) + S(D'''_n).$$

Odtud dostaneme limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ s využitím 5.1.9

$$\int_a^b f(x)dx = \int_{\bar{a}}^c f(x)dx + \int_{\bar{c}}^d f(x)dx + \int_{\bar{d}}^b f(x)dx, \quad \int_a^b f(x)dx = \int_a^{\bar{c}} f(x)dx + \int_c^{\bar{d}} f(x)dx + \int_d^{\bar{b}} f(x)dx.$$

Odečtením těchto rovností dostaneme

$$0 = \left(\int_{\bar{a}}^c f(x)dx - \int_a^{\bar{c}} f(x)dx \right) + \left(\int_{\bar{c}}^d f(x)dx - \int_c^{\bar{d}} f(x)dx \right) + \left(\int_{\bar{d}}^b f(x)dx - \int_d^{\bar{b}} f(x)dx \right).$$

Poněvadž všechny sčítance jsou nezáporné, musí být nulové. Zejména

$$\int_{\bar{c}}^d f(x)dx = \int_c^{\bar{d}} f(x)dx.$$

□

5.2.15 Důkaz věty 5.1.14

D.: Buď $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné.

Poněvadž funkce f je na intervalu $[a, b]$ ohraničená, existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$ takové, že $-k \leq f(x) \leq k$ pro každé $x \in [a, b]$.

Buď M množina bodů nespojitosti funkce f . Poněvadž je tato množina nulová, existují

$$a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n \in \mathbb{R}, \quad a \leq a_1 < b_1 < a_2 < b_2 < \dots < a_n < b_n \leq b$$

takové, že $M \subseteq (a_1, b_1) \cup (a_2, b_2) \cup \dots \cup (a_n, b_n)$ a $\sum_{i=1}^n (b_i - a_i) < \frac{\varepsilon}{2k}$.

Předpokládejme, že $a < a_1$, $b_n < b$. (V opačném případě bychom provedli analogické úvahy.)

Na každém z intervalů $[a, a_1]$, $[b_1, a_2]$, \dots , $[b_{n-1}, a_n]$, $[b_n, b]$ je funkce f spojitá a tedy podle 5.1.12 integrabilní.

Na každém intervalu (a_1, b_1) , (a_2, b_2) , \dots , (a_n, b_n) podle 5.1.5 platí

$$-k(b_i - a_i) \leq \int_{\bar{a}_i}^{b_i} f(x)dx \leq \int_{a_i}^{\bar{b}_i} f(x)dx \leq k(b_i - a_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Podle 5.2.13.2 je

$$\begin{aligned} \int_{\bar{a}}^b f(x)dx &= \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx + \sum_{i=1}^n \int_{\bar{a}_i}^{b_i} f(x)dx \geq \\ &\geq \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx - k \sum_{i=1}^n (b_i - a_i) > \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&> \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx - k \frac{\varepsilon}{2k} = \\
&= \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx - \frac{\varepsilon}{2}.
\end{aligned}$$

Analogicky ukážeme, že

$$\int_a^{\bar{a}} f(x)dx < \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx + \frac{\varepsilon}{2}.$$

Odtud

$$0 \leq \int_a^{\bar{a}} f(x)dx - \int_a^b f(x)dx < \varepsilon.$$

Poněvadž $\varepsilon > 0$ bylo libovolné, je

$$\int_a^{\bar{a}} f(x)dx = \int_a^b f(x)dx.$$

□

5.2.16 Věta

Nechť f, g jsou ohraničené funkce na intervalu $[a, b]$ a necht' množina $M = \{x \in [a, b] : f(x) \neq g(x)\}$ je nulová. Je-li jedna z funkcí f, g integrabilní na $[a, b]$, je integrabilní i druhá z nich a platí

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b g(x)dx.$$

D.: Necht' funkce f je integrabilní a buď $\varepsilon \in \mathbb{R}$, $\varepsilon > 0$ libovolné.

Buď $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$ takové, že $-k \leq g(x) \leq k$ pro $x \in [a, b]$.

Poněvadž M je nulová, existují $a \leq a_1 < b_1 < a_2 < b_2 < \dots < a_n < b_n \leq b$ takové, že

$$M \subseteq (a_1, b_1) \cup (a_2, b_2) \cup \dots \cup (a_n, b_n), \quad \sum_{i=1}^n (b_i - a_i) \leq \frac{\varepsilon}{2k}.$$

Podle 5.2.14 je funkce f na každém z intervalů $[a, a_1], [b_1, a_2], [b_2, a_3], \dots, [b_n, b]$ integrabilní.

Na každém z těchto intervalů jsou funkce f, g shodné, tedy i g je na nich integrabilní a platí

$$\int_a^{a_1} f(x)dx = \int_a^{a_1} g(x)dx, \quad \int_{b_1}^{a_2} f(x)dx = \int_{b_1}^{a_2} g(x)dx, \quad \dots, \quad \int_{b_n}^b f(x)dx = \int_{b_n}^b g(x)dx.$$

Na každém z intervalů $[a_i, b_i]$ platí

$$-k(b_i - a_i) \leq \int_{\bar{a}_i}^{b_i} g(x)dx \leq \int_{a_i}^{b_i} g(x)dx \leq k(b_i - a_i).$$

Analogicky jako v důkazu věty 5.1.14 ukážeme

$$\begin{aligned}
\int_{\bar{a}}^b g(x)dx &> \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx - \frac{\varepsilon}{2}, \\
\int_a^{\bar{a}} g(x)dx &< \int_a^{a_1} f(x)dx + \int_{b_n}^b f(x)dx + \sum_{i=1}^{n-1} \int_{b_i}^{a_{i+1}} f(x)dx + \frac{\varepsilon}{2},
\end{aligned}$$

z čehož opět vyplýne

$$\int_{\bar{a}}^b g(x)dx = \int_a^{\bar{b}} g(x)dx.$$

□

V důsledku věty 5.2.16 není při úvahách o Riemannovu integrálu nutné předpokládat, že ohraničená funkce je definovaná na celém intervalu $[a, b]$. Stačí, je-li definovaná na $[a, b]$ s výjimkou nulové množiny. Zejména lze tedy hovořit o funkci integritelní na otevřeném intervalu (a, b) .

5.3 Integrál jako funkce horní meze

5.3.1 Úmluva

Nechť $a \in \mathbb{R}$ a funkce f je definována v a (tj. $a \in \text{Dom } f$). Pak klademe $\int_a^a f(x)dx = 0$.

Nechť $a, b \in \mathbb{R}$, $a > b$ a nechť funkce f je integritelní na intervalu $[b, a]$. Pak klademe $\int_a^b f(x)dx = -\int_b^a f(x)dx$.

Snadno ověříme, že při této rozšířené definici zůstávají v platnosti všechna tvrzení předchozího odstavce.

Nechť funkce f je integritelní na $[a, b]$ a $x \in [a, b]$. Podle 5.2.14 je funkce f integritelní na $[a, x]$. Funkci $F(x) = \int_a^x f(t)dt$ definovanou na $[a, b]$ nazýváme *integrál jako funkce horní meze*.

5.3.2 Věta

Nechť funkce f je integritelní na $[a, b]$. Pak je funkce $F(x) = \int_a^x f(t)dt$ spojitá na $[a, b]$.

D.: Buď $x_0 \in [a, b]$, $\varepsilon > 0$ libovolné.

Poněvadž f je integritelní, je ohraničená a tedy existuje $c \in \mathbb{R}$ takové, že $|f(x)| \leq c$ pro $x \in [a, b]$.

Položme $\delta = \frac{\varepsilon}{c}$.

Buď $x \in [a, b] \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ libovolný. Pak

$$|F(x_0) - F(x)| = \left| \int_a^{x_0} f(t)dt - \int_a^x f(t)dt \right| = \left| \int_{x_0}^x f(t)dt \right| \leq |x - x_0|c < \delta c = \frac{\varepsilon}{c}c = \varepsilon.$$

(První nerovnost plyne z 5.2.2) □

5.3.3 Věta

Nechť je funkce f integritelní na $[a, b]$ a spojitá v $x_0 \in [a, b]$. Pak funkce $F(x) = \int_a^x f(t)dt$ má derivaci v x_0 a platí $F'(x_0) = f(x_0)$.

V případě $x_0 = a$ nebo $x_0 = b$ se jedná o příslušnou jednostrannou derivaci.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Poněvadž f je spojitá v x_0 , k $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap [a, b]$ platí $|f(x) - f(x_0)| \leq \frac{\varepsilon}{2}$.

Tedy pro $x \neq x_0$, $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap [a, b]$ platí

$$\begin{aligned} \left| \frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0} - f(x_0) \right| &= \left| \frac{1}{x - x_0} \left(\int_a^x f(t) dt - \int_a^{x_0} f(t) dt \right) - \frac{f(x_0)(x - x_0)}{x - x_0} \right| = \\ &= \left| \frac{1}{x - x_0} \left(\int_{x_0}^x f(t) dt - \int_{x_0}^x f(x_0) dt \right) \right| = \\ &= \frac{1}{|x - x_0|} \left| \int_{x_0}^x (f(t) - f(x_0)) dt \right| \leq \\ &\leq \frac{1}{|x - x_0|} \left| \int_{x_0}^x |f(t) - f(x_0)| dt \right| \leq \frac{1}{|x - x_0|} \left| \int_{x_0}^x \frac{\varepsilon}{2} dt \right| = \\ &= \frac{1}{|x - x_0|} |x - x_0| \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon. \end{aligned}$$

Tedy $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0} = f(x_0)$. \square

5.3.4 Důsledek

Je-li funkce f spojitá na $[a, b]$, pak $F(x) = \int_a^x f(t) dt$ má na $[a, b]$ derivaci a platí $F'(x) = f(x)$.

Buď f integrabilní na $[a, b]$, $c \in [a, b]$ libovolný, pevně zvolený bod. Funkce f je na intervalu s krajními body $c, x \in [a, b]$ (tj. na intervalu $[c, x]$ pro $x > c$ nebo $[x, c]$ pro $x < c$) podle 5.2.14 integrabilní. Lze tedy definovat funkci $F(x) = \int_c^x f(t) dt$.

5.3.5 Poznámka

Nechť f je funkce integrabilní na $[a, b]$ a $c \in [a, b]$. Pak je funkce $F(x) = \int_c^x f(t) dt$ spojitá na $[a, b]$.

Je-li funkce f spojitá v bodě $x_0 \in [a, b]$, má funkce $F = \int_c^x f(t) dt$ v tomto bodě derivaci a platí $F'(x_0) = f(x_0)$.

D.: Podle 5.3.1 a 5.2.12 je $\int_c^x f(t) dt = \int_a^x f(t) dt - \int_a^c f(t) dt$.

$\int_a^c f(t) dt$ je konstanta, tedy spojitá funkce mající nulovou derivaci. Tvrzení nyní plyne z 5.3.2 a z 5.3.3. \square

5.3.6 Věta (o existenci primitivní funkce)

K funkci f spojitě na intervalu J existuje na tomto intervalu funkce primitivní.

D.: Je-li interval J uzavřený, plyne tvrzení z 5.3.4.

Nechť J není uzavřený. Zvolme pevně $c \in J$ a položme $F(x) = \int_c^x f(t) dt$.

F je definována na celém J , neboť pro $x \in J$ je funkce f spojitá na uzavřeném intervalu s krajními body c a x a tedy podle 5.1.12 integrabilní.

Buď $x_0 \in J$ libovolný. Zvolme $a, b \in J$, $a \leq \min\{c, x_0\}$, $b \geq \max\{c, x_0\}$.

Pak $c \in [a, b]$, $x_0 \in [a, b]$ a f je spojitá na $[a, b]$. Podle 5.3.5 tedy platí $F'(x_0) = f(x_0)$.

Poněvadž $x_0 \in J$ byl libovolný, platí $F'(x_0) = f(x_0)$ pro každé $x \in J$. \square

Je-li f integrabilní funkce na $[a, b]$, lze analogicky uvažovat *integrál jako funkci dolní meze* $G(x) = \int_x^b f(t)dt$, nebo obecněji $G(x) = \int_x^c f(t)dt$ pro $c \in [a, b]$.

5.3.7 Poznámka

Nechť funkce f je integrabilní na $[a, b]$, $c \in [a, b]$. Pak je funkce $G(x) = \int_x^c f(t)dt$ spojitá na $[a, b]$.

Je-li funkce f spojitá v bodě $x_0 \in [a, b]$, má funkce G v tomto bodě derivaci a platí $G'(x_0) = -f(x_0)$.

5.4 Nevlastní integrály

V dosavadních úvahách o $\int_a^b f(x)dx$ jsme předpokládali

- (i) $a, b \in \mathbb{R}$, tj. interval (a, b) má konečnou délku,
- (ii) f je ohraničená na (a, b) .

V tomto odstavci rozšíříme pojem integrálu na případy, kdy některý z těchto předpokladů není splněn. V takovém případě mluvíme o *nevlastních integrálech*.

Nejdříve budeme uvažovat nesplnění prvního předpokladu.

5.4.1 Definice

Nechť $a \in \mathbb{R}$ a f je funkce definovaná na $[a, \infty)$, která je integrabilní na každém intervalu $[a, b]$, kde $b > a$, $b \in \mathbb{R}$.

Položme $F(t) = \int_a^t f(x)dx$.

Existuje-li vlastní limita $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t)$, řekneme, že nevlastní integrál $\int_a^\infty f(x)dx$ *konverguje* a klademe

$$\int_a^\infty f(x)dx = \lim_{t \rightarrow \infty} F(t).$$

Neexistuje-li vlastní limita $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t)$, řekneme, že nevlastní integrál $\int_a^\infty f(x)dx$ *diverguje*.

Analogicky definujeme konvergenci nevlastního integrálu $\int_{-\infty}^a f(x)dx$, $a \in \mathbb{R}$.

Je-li funkce f definována na \mathbb{R} a integrabilní na každém uzavřeném intervalu, pak pravíme, že nevlastní integrál $\int_{-\infty}^\infty f(x)dx$ *konverguje*, jestliže pro nějaké $a \in \mathbb{R}$ konvergují nevlastní integrály $\int_{-\infty}^a f(x)dx$ a $\int_a^\infty f(x)dx$ a klademe

$$\int_{-\infty}^\infty f(x)dx = \int_{-\infty}^a f(x)dx + \int_a^\infty f(x)dx.$$

5.4.2 Příklady

1. $\int_1^\infty \frac{dx}{x^k}$, $k \in \mathbb{R}$

$$k \neq 1: F(t) = \int_1^t \frac{dx}{x^k} = \left[\frac{1}{-k+1} \frac{1}{x^{k-1}} \right]_1^t = \frac{1}{1-k} \left(\frac{1}{t^{k-1}} - 1 \right), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \begin{cases} \frac{1}{k-1}, & k > 1 \\ \infty, & k < 1 \end{cases}$$

$$k = 1: F(t) = \int_1^t \frac{dx}{x} = [\ln x]_1^t = \ln t - \ln 1, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \infty$$

Tedy $\int_1^\infty \frac{dx}{x^k}$ konverguje pro $k > 1$ a diverguje pro $k \leq 1$.

$$2. \int_0^{\infty} e^{-kx} dx, \quad k \in \mathbb{R}$$

$$k \neq 0: F(t) = \int_0^t e^{-kx} dx = \left[-\frac{e^{-kx}}{k} \right]_0^t = \frac{1}{k} - \frac{e^{-kt}}{k}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \begin{cases} \frac{1}{k}, & k > 0 \\ \infty, & k < 0 \end{cases}$$

$$k = 0: F(t) = \int_0^t dx = t, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = \infty$$

Tedy $\int_0^{\infty} e^{-kx} dx$ konverguje pro $k > 0$ a diverguje pro $k \leq 0$.

$$3. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{1+x^2}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \frac{dx}{1+x^2} = \lim_{t \rightarrow \infty} [\arctg x]_0^t = \lim_{t \rightarrow \infty} \arctg t = \frac{\pi}{2}$$

$$\int_{-\infty}^0 \frac{dx}{1+x^2} = \lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^0 \frac{dx}{1+x^2} = \lim_{t \rightarrow -\infty} [\arctg x]_t^0 = \lim_{t \rightarrow -\infty} (-\arctg t) = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{Tedy } \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{1+x^2} = \pi.$$

$$4. \int_0^{\infty} \cos x dx$$

$$F(t) = \int_0^t \cos x dx = [\sin x]_0^t = \sin t, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(t) \text{ neexistuje, } \int_0^{\infty} \cos x dx \text{ diverguje.}$$

$$5. \int_0^{\infty} f(x) dx, \text{ kde } f(x) = \begin{cases} n, & x = n \in \mathbb{N} \\ 0, & x \notin \mathbb{N} \end{cases}$$

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = 0, \text{ tedy } \int_0^{\infty} f(x) dx = 0.$$

Ne vlastní integrál může konvergovat, i když je integrovaná funkce neohraničená.

V tvrzeních 5.4.3 – 5.4.8 budeme předpokládat, že všechny uvažované funkce jsou definovány na $[a, \infty)$, $a \in \mathbb{R}$ a integrabilní na $[a, b]$ pro každé $b > a$.

Tato tvrzení se týkají integrálů typu $\int_a^{\infty} f(x) dx$. Po příslušné úpravě předpokladů však platí i pro integrály typu $\int_{-\infty}^a f(x) dx$.

5.4.3 Věta (Cauchyovo – Bolzanovo kritérium)

Integrál $\int_a^{\infty} f(x) dx$ konverguje právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $x_0 \geq a$ takové, že pro každá dvě

$$t_1, t_2 \in \mathbb{R}, \quad t_1 > x_0, \quad t_2 > x_0 \text{ platí } \left| \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx \right| < \varepsilon.$$

D.: Plyne z 2.1.6. \square

5.4.4 Věta (Srovnávací kritérium)

Nechť na intervalu $[a, \infty)$ platí $0 \leq f(x) \leq g(x)$.

Konverguje-li $\int_a^{\infty} g(x) dx$, konverguje i $\int_a^{\infty} f(x) dx$.

Diverguje-li $\int_a^{\infty} f(x) dx$, diverguje i $\int_a^{\infty} g(x) dx$.

D.: Necht' $\int_a^\infty g(x)dx$ konverguje. Podle 5.4.3 existuje $x_0 \geq a$ takové, že pro každá $t_1, t_2 \in \mathbb{R}$, $t_1 > x_0$, $t_2 > x_0$ platí $\left| \int_{t_1}^{t_2} g(x)dx \right| < \varepsilon$.

Volme označení tak, že $t_1 < t_2$. Pak podle 5.2.2.1 je $\int_{t_1}^{t_2} g(x)dx \geq 0$, $\int_{t_1}^{t_2} f(x)dx \geq 0$.

Tedy $\left| \int_{t_1}^{t_2} f(x)dx \right| = \int_{t_1}^{t_2} f(x)dx \leq \int_{t_1}^{t_2} g(x)dx = \left| \int_{t_1}^{t_2} g(x)dx \right| < \varepsilon$. (První nerovnost plyne z 5.2.6)

Podle 5.4.3 $\int_a^\infty f(x)dx$ konverguje.

Necht' $\int_a^\infty f(x)dx$ diverguje. Podle první části důkazu nemůže $\int_a^\infty g(x)dx$ konvergovat. \square

5.4.5 Věta (limitní srovnávací kritérium)

Necht' funkce f, g jsou nezáporné na $[a, b)$ a necht' existuje $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = c \in \mathbb{R}^*$.

Je-li $c < \infty$ a konverguje-li $\int_a^\infty g(x)dx$, pak konverguje i $\int_a^\infty f(x)dx$.

Je-li $c > 0$ a diverguje-li $\int_a^\infty g(x)dx$, pak diverguje i $\int_a^\infty f(x)dx$.

D.: Necht' $c < \infty$ a $\int_a^\infty g(x)dx$ konverguje.

Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $x_0 \in \mathbb{R}$, $x_0 \geq a$ takové, že pro $x \geq x_0$ platí $c - \varepsilon < \frac{f(x)}{g(x)} < c + \varepsilon$, neboli $f(x) < (c + \varepsilon)g(x)$.

Z konvergence $\int_a^\infty g(x)dx$ plyne konvergence $\int_{x_0}^\infty g(x)dx$ a tedy i konvergence $\int_{x_0}^\infty (c + \varepsilon)g(x)dx$. Odtud podle

5.4.4 plyne konvergence $\int_{x_0}^\infty f(x)dx$ a tedy i konvergence $\int_a^\infty f(x)dx$.

Necht' $c > 0$ a $\int_a^\infty g(x)dx$ diverguje.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{g(x)}{f(x)} = \begin{cases} \frac{1}{c}, & c < \infty \\ 0, & c = \infty \end{cases}$$

Kdyby $\int_a^\infty f(x)dx$ konvergoval, pak by podle první části důkazu $\int_a^\infty g(x)dx$ konvergoval. \square

5.4.6 Důsledky

1. Necht' funkce f, g jsou nezáporné na $[a, b)$. Jestliže $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = c \in (0, \infty)$, pak oba nevlastní integrály

$\int_a^\infty f(x)dx$ a $\int_a^\infty g(x)dx$ buď současně konvergují, nebo současně divergují.

2. Bud' f nezáporná funkce na intervalu $[a, \infty)$.

- Jestliže existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 1$ takové, že $\lim_{x \rightarrow \infty} x^k f(x) < \infty$, pak $\int_a^\infty f(x)dx$ konverguje.
- Jestliže existuje $k \in \mathbb{R}$, $k \leq 1$ takové, že $\lim_{x \rightarrow \infty} x^k f(x) > 0$, pak $\int_a^\infty f(x)dx$ diverguje.
- Jestliže existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$ takové, že $\lim_{x \rightarrow \infty} e^{kx} f(x) < \infty$, pak $\int_a^\infty f(x)dx$ konverguje.

- Jestliže existuje $k \in \mathbb{R}$, $k \leq 0$ takové, že $\lim_{x \rightarrow \infty} e^{kx} f(x) > 0$, pak $\int_a^{\infty} f(x) dx$ diverguje.

D.: 5.4.5, 5.4.2.1 a 5.4.2.2. \square

5.4.7 Věta (Nutná podmínka konvergence nevlastního integrálu)

Nechť $\int_a^{\infty} f(x) dx$ konverguje a necht' existuje $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = c \in \mathbb{R}^*$. Pak $c = 0$.

D.: Pripustíme $c > 0$.

Podle definice limity existují $x_0 \geq a$ a $k > 0$ takové, že pro $x \geq x_0$ je $f(x) > k$.

$\int_{x_0}^{\infty} k dx = \lim_{t \rightarrow \infty} k(t - x_0) = \infty$. Podle 5.4.4 diverguje $\int_{x_0}^{\infty} f(x) dx$ a tedy i $\int_a^{\infty} f(x) dx$ — spor.

Možnost $c < 0$ vyloučíme analogicky. \square

Poznámka: Předpoklad o existenci $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ nelze obecně vynechat, jak ukazuje 5.4.2.5.

5.4.8 Věta

Konverguje-li $\int_a^{\infty} |f(x)| dx$, pak konverguje i $\int_a^{\infty} f(x) dx$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 5.4.3 existují $x_0 \geq a$ a $t_1, t_2 > x_0$ takové, že $\left| \int_{t_1}^{t_2} |f(x)| dx \right| < \varepsilon$. Volme $t_1 < t_2$.

Pak $\left| \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx \right| \leq \int_{t_1}^{t_2} |f(x)| dx = \left| \int_{t_1}^{t_2} |f(x)| dx \right| < \varepsilon$ (první nerovnost platí podle 5.2.9).

Tvrzení nyní plyne z 5.4.3. \square

5.4.9 Definice

Nechť f je funkce definovaná na $[a, \infty)$ a integrabilní na $[a, b]$ pro každé $b > a$. Řekneme, že nevlastní integrál $\int_a^{\infty} f(x) dx$ konverguje absolutně, jestliže konverguje $\int_a^{\infty} |f(x)| dx$.

Poznámky:

- Z 5.4.8 plyne, že konverguje-li $\int_a^{\infty} f(x) dx$ absolutně, pak konverguje.
- Je-li f nezáporná funkce na $[a, \infty)$ a integrál $\int_a^{\infty} f(x) dx$ konverguje, pak konverguje absolutně.

Nyní budeme uvažovat nesplnění druhého z předpokladů uvedených na začátku odstavce.

5.4.10 Definice

Nechť $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$ a necht' funkce f je definována na $[a, b)$. Řekneme, že b je *singulární bod* funkce f , jestliže f není ohraničená na $[a, b)$ a pro každé $\beta \in (a, b)$ je integrabilní na $[a, \beta]$.

5.4.11 Definice

Nechť f je funkce definovaná na $[a, b)$ a necht' b je jejím singulárním bodem. Pro $t \in [a, b)$ položme

$$F(t) = \int_a^t f(x) dx.$$

Existuje-li vlastní $\lim_{t \rightarrow b^-} F(t)$, řekneme, že nevlastní integrál $\int_a^b f(x) dx$ konverguje a klademe

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{t \rightarrow b^-} F(t).$$

Neexistuje-li vlastní $\lim_{t \rightarrow b^-} F(t)$, řekneme, že nevlastní integrál $\int_a^b f(x)dx$ *diverguje*.

Analogicky definujeme singulární bod a pro funkci definovanou na intervalu $(a, b]$ a konvergenci nebo divergenci nevlastního integrálu $\int_a^b f(x)dx$.

5.4.12 Příklad

$$\int_0^1 \frac{dx}{x^k}, \quad k \in \mathbb{R}, \quad k > 0$$

$$k \neq 1: F(t) = \int_t^1 \frac{dx}{x^k} = \left[\frac{1}{1-k} \frac{1}{x^{k-1}} \right]_t^1 = \frac{1}{1-k} \left(1 - \frac{1}{t^{k-1}} \right), \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} F(t) = \begin{cases} \frac{1}{1-k}, & k < 1 \\ \infty, & k > 1 \end{cases}$$

$$k = 1: F(t) = \int_t^1 \frac{dx}{x} = [\ln x]_t^1 = \ln 1 - \ln t = -\ln t, \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} F(t) = \infty$$

Tedy $\int_0^1 \frac{dx}{x^k}$ konverguje pro $k < 1$ a diverguje pro $k \geq 1$.

Pro nevlastní integrály typu $\int_a^b f(x)dx$ platí tvrzení analogická 5.4.3, 5.4.4, 5.4.5 a 5.4.8. Důkazy se provedou shodným způsobem.

5.4.13 Věta (Cauchyovo – Bolzanovo kritérium)

Integrál $\int_a^b f(x)dx$, kde b je singulární bod funkce f konverguje právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $x_0 \in [a, b)$ takové, že pro každá dvě $t_1, t_2 \in (x_0, b)$ platí $\left| \int_{t_1}^{t_2} f(x)dx \right| < \varepsilon$.

5.4.14 Věta (Srovnávací kritérium)

Nechť b je singulárním bodem funkce f i funkce g a nechť na intervalu $[a, b)$ platí $0 \leq f(x) \leq g(x)$.

Konverguje-li $\int_a^b g(x)dx$, konverguje i $\int_a^b f(x)dx$.

Diverguje-li $\int_a^b f(x)dx$, diverguje i $\int_a^b g(x)dx$.

5.4.15 Věta (limitní srovnávací kritérium)

Nechť b je singulárním bodem funkce f i funkce g , funkce f, g jsou nezáporné na $[a, b)$ a nechť existuje

$$\lim_{x \rightarrow b^-} \frac{f(x)}{g(x)} = c \in \mathbb{R}^*.$$

Je-li $c < \infty$ a konverguje-li $\int_a^b g(x)dx$, pak konverguje i $\int_a^b f(x)dx$.

Je-li $c > 0$ a diverguje-li $\int_a^b g(x)dx$, pak diverguje i $\int_a^b f(x)dx$.

5.4.16 Věta

Nechť b je singulárním bodem funkce f . Konverguje-li $\int_a^b |f(x)|dx$, pak konverguje i $\int_a^b f(x)dx$.

Analogická tvrzení platí i pro nevlastní integrály typu $\int_a^b f(x)dx$, je-li a singulárním bodem funkce f .

5.5 Aplikace určitého integrálu

5.5.1 Průměrná hodnota (integrální průměr) veličiny $y = f(x)$ na intervalu $[a, b]$

$$\bar{y} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx$$

5.5.2 Plocha rovinného obrazce

1. Obrazec v kartézských souřadnicích určený nerovnostmi $a \leq x \leq b$, $f_1(x) \leq y \leq f_2(x)$.

$$S = \int_a^b (f_2(x) - f_1(x))dx$$

2. Obrazec v kartézských souřadnicích ohraničený uzavřenou křivkou o parametrických rovnicích $x = x(t)$, $y = y(t)$, $t \in [\alpha, \beta]$. Křivka je orientována kladně, tj. tak, že plocha leží nalevo od křivky.

$$S = - \int_{\alpha}^{\beta} y(t)x'(t)dt = \int_{\alpha}^{\beta} x(t)y'(t)dt = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} (x(t)y'(t) - x'(t)y(t))dt$$

3. Plocha, kterou opisuje průvodič křivky, zadané v polárních souřadnicích rovnicí $r = r(\varphi)$, $\alpha \leq \varphi \leq \beta$.

$$S = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} (r(\varphi))^2 d\varphi$$

5.5.3 Délka rovinné křivky

1. Křivka zadána parametrickými rovnicemi $x = x(t)$, $y = y(t)$, $t \in [\alpha, \beta]$.

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt$$

2. Křivka je grafem funkce $y = f(x)$ na intervalu $[a, b]$.

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx$$

3. Křivka zadána v polárních souřadnicích rovnicí $r = r(\varphi)$, $\alpha \leq \varphi \leq \beta$.

$$s = \int_{\alpha}^{\beta} \sqrt{(r(\varphi))^2 + (r'(\varphi))^2} d\varphi$$

5.5.4 Objem tělesa

1. Těleso ohraničené rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe na vzdálenost a se známými plochami řezů $S(x)$ rovinami rovnoběžnými s podstavami ve vzdálenosti x .

$$V = \int_0^a S(x) dx$$

2. Těleso vzniklé rotací podgrafu funkce f na intervalu $[a, b]$ kolem osy x .

$$V = \pi \int_a^b (f(x))^2 dx$$

3. Těleso vzniklé rotací podgrafu funkce f na intervalu $[a, b]$ kolem osy y .

$$V = 2\pi \int_a^b x f(x) dx$$

5.5.5 Plocha pláště rotačního tělesa

1. Těleso vzniklé rotací křivky o parametrických rovnicích $\begin{matrix} x = x(t) \\ y = y(t) \end{matrix}$, $t \in [\alpha, \beta]$.

$$S = 2\pi \int_{\alpha}^{\beta} |y(t)| \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt$$

2. Těleso vzniklé rotací grafu funkce $y = f(x)$ na intervalu $[a, b]$.

$$S = 2\pi \int_a^b |f(x)| \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx$$

5.6 Cvičení

Rozhodněte o konvergenci nevlastních integrálů

1) $\int_0^{\infty} \frac{x^2}{x^4 - x^2 + 1} dx$, 2) $\int_0^2 \frac{dx}{\ln x}$, 3) $\int_2^{\infty} \frac{\ln^k x}{x} dx$.

Vypočítejte plochu obrazce ohraničeného danými křivkami (x, y jsou kartézské souřadnice, r, φ polární)

4) $y = |\log_{10} x|$, $y = 0$, $x = \frac{1}{10}$, $x = 10$, 5) $y = (x + 1)^2$, $x = \sin \pi x$, $y = 0$,

6) $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, 7) $y^2 = x^2(a^2 - x^2)$,

8) $x = 2t - t^2$, $y = 2t^2 - t^3$, 9) $x = \frac{a^2 - b^2}{a} \cos^3 t$, $y = \frac{a^2 - b^2}{b} \sin^3 t$,

10) $r = a \sin 3\varphi$, 11) $r = \frac{p}{1 - \cos \varphi}$, $\varphi = \frac{\pi}{4}$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$,

12) $(x^2 + y^2)^2 = 2a^2xy$.

Vypočítejte délku křivky

13) $y = \sqrt{x^3}$, $0 \leq x \leq 4$,

14) $y = \ln(\cos x)$, $0 \leq x \leq a < \frac{\pi}{2}$,

15) $x = a(t - \sin t)$, $y = a(1 - \cos t)$, $0 \leq t \leq 2\pi$,

16) $x = \frac{a^2 - b^2}{a} \cos^3 t$, $y = \frac{a^2 - b^2}{b} \sin^3 t$,

17) $r = a \sin^3 \frac{\varphi}{3}$,

18) $r = a\varphi$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Vypočítejte objem tělesa ohraničeného plochami

19) $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, $z = \frac{c}{a}x$, $z = 0$,

20) $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$, $z = \pm c$.

21) Vypočítejte objem tělesa vzniklého rotací obrazce ohraničeného křivkami $y = 2x - x^2$, $y = 0$ kolem osy x a objem tělesa vzniklého rotací téhož obrazce kolem osy y .

22) Vypočítejte objem tělesa vzniklého rotací obrazce ohraničeného křivkami o parametrických rovnicích $x = a \sin^3 t$, $y = b \cos^3 t$ kolem osy x a objem tělesa vzniklého rotací téhož obrazce kolem osy y .

23) Vypočítejte povrch tělesa vzniklého rotací asteroidy $x^{2/3} + y^{2/3} = a^{2/3}$ kolem osy x .

Výsledky:

- 1) konverguje 2) diverguje 3) konverguje pro $k < -1$, diverguje pro $k \geq -1$ 4) $\frac{99 \ln 10 - 81}{\ln 100}$ 5) $\frac{\pi+2}{3\pi}$ 6) πab 7) $\frac{4}{3}a^3$ 8) $\frac{8}{15}$ 9) $\frac{3}{8}\pi \frac{(a^2-b^2)^2}{ab}$ 10) $\frac{\pi a^2}{4}$ 11) $\frac{p^2}{6} (3 + 4\sqrt{2})$ 12) a^2 13) $\frac{8}{27} (10\sqrt{10} - 1)$ 14) $\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{a}{2} \right)$ 15) $8a$ 16) $\frac{4(a^3-b^3)}{ab}$ 17) $\frac{3\pi a}{2}$ 18) $|a| \left(\pi\sqrt{1+4\pi^2} + \ln\sqrt{2\pi+\sqrt{1+4\pi^2}} \right)$ 19) $\frac{2}{3}abc$ 20) $\frac{8}{3}\pi abc$ 21) $\frac{16}{15}\pi$, $\frac{8}{3}\pi$ 22) $\frac{32}{105}\pi ab^2$, $\frac{32}{105}\pi a^2 b$ 23) $\frac{12}{5}\pi a^2$

5.7 Kontrolní otázky

1) **Uveďte Definicí x.y.z;**

- definici (definovaný pojem) vysvětlete
- ilustrujte na příkladě, příp. náčrtem
- presentujte přehled základních vlastností
- charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití

2) **Formulujte Větu x.y.z;**

- vysvětlete předpoklady
- vysvětlete tvrzení
- větu ilustrujte příkladem, příp. náčrtem
- uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
- presentujte teoretický a případně praktický význam

3) **Vyřešte příklad x.y.z;**

- popište jednotlivé kroky postupu
- citujte použitá tvrzení
- postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 6

Doplňěk

6.1 Numerická integrace

6.1.1 Lemma

Bud' f funkce definovaná na intervalu $[a, b]$, která má na intervalu (a, b) druhou derivaci. Pak ke každému $x \in [a, b]$ existuje $\xi \in (a, b)$ takové, že

$$f(x) = f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) - \frac{f''(\xi)}{2}(x - a)(b - x).$$

D.: Označme $P(x) = f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a)$. Pak P je lineární polynom a platí $P(a) = f(a)$, $P(b) = f(b)$. Tedy pro $x = a$ nebo $x = b$ platí formule v tvrzení při libovolném $\xi \in (a, b)$.

Bud' $x_0 \in (a, b)$ libovolný pevně zvolený bod a položme $F(x) = f(x) - P(x) - \frac{f(x_0) - P(x_0)}{(x_0 - a)(b - x_0)}(x - a)(b - x)$.

Pak platí $F(a) = F(b) = F(x_0) = 0$. Podle 2.5.1 existují $\xi_1 \in (a, x_0)$ a $\xi_2 \in (x_0, b)$ takové, že $F'(\xi_1) = F'(\xi_2) = 0$. Dále opět podle 2.5.1 existuje $\xi \in (\xi_1, \xi_2)$ takové, že $F''(\xi) = 0$.

Pro každé $x \in (a, b)$ platí $P''(x) = 0$, $[(x - a)(b - x)]'' = -2$, tedy $0 = F''(\xi) = f''(\xi) + 2 \frac{f(x_0) - P(x_0)}{(x_0 - a)(b - x_0)}$.

Odtud $f(x_0) = -\frac{f''(\xi)}{2}(x_0 - a)(b - x_0) + P(x_0)$ a poněvadž $x_0 \in (a, b)$ bylo libovolné, je tvrzení dokázáno. \square

6.1.2 Lemma

Bud' f funkce definovaná na intervalu $[a, b]$, která má na intervalu (a, b) druhou derivaci takovou, že $|f''(x)| \leq M$ pro každé $x \in (a, b)$. Pak pro každé $x \in [a, b]$ platí

$$f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) + \frac{M}{2}(x^2 - (a + b)x + ab) \leq f(x) \leq f(a) + \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) - \frac{M}{2}(x^2 - (a + b)x + ab).$$

D.: Podle 6.1.1 je pro každé $x \in [a, b]$

$$\left| f(x) - f(a) - \frac{f(b) - f(a)}{b - a}(x - a) \right| = \frac{|f''(\xi(x))|}{2}(x - a)(b - x) \leq \frac{M}{2}(-x^2 + (a + b)x - ab),$$

z čehož plyne tvrzení. \square

6.1.3 Věta (lichoběžníkové pravidlo)

Buď f funkce definovaná na intervalu $[a, b]$, která má na intervalu (a, b) ohraničenou druhou derivaci a buď $n \in \mathbb{N}$. Označme

$$\begin{aligned} h &= \frac{b-a}{n}, \\ x_i &= a + ih, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n, \\ I_n(f, a, b) &= \frac{h}{2}(f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)), \\ M &= \sup\{|f''(x)| : x \in (a, b)\}. \end{aligned}$$

Pak

$$\left| I_n(f, a, b) - \int_a^b f(x) dx \right| \leq \frac{M(b-a)^3}{12n^2}.$$

D.: Pro každé $i \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ je

$$\begin{aligned} & \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} (x - x_i) \pm \frac{M}{2} (x^2 - (x_i + x_{i+1})x + x_i x_{i+1}) \right) dx = \\ &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} (x - x_i) \pm \frac{M}{2} (x^2 - (x_i + x_{i+1})x + x_i x_{i+1}) \right) dx = \\ &= f(x_i)(x_{i+1} - x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} \left[\frac{(x - x_i)^2}{2} \right]_{x_i}^{x_{i+1}} \pm \frac{M}{2} \left[\frac{x^3}{3} - (x_i + x_{i+1}) \frac{x^2}{2} + x_i x_{i+1} x \right]_{x_i}^{x_{i+1}} = \\ &= hf(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h} \frac{h^2}{2} \pm \frac{M}{2} \left(\frac{x_{i+1}^3 - x_i^3}{3} - (x_i + x_{i+1}) \frac{x_{i+1}^2 - x_i^2}{2} + x_i x_{i+1} (x_{i+1} - x_i) \right) = \\ &= \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \pm \frac{M}{2} h \left(\frac{x_{i+1}^2 + x_{i+1}x_i + x_i^2}{3} - \frac{x_{i+1}^2 + 2x_{i+1}x_i + x_i^2}{2} + x_{i+1}x_i \right) = \\ &= \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \pm \frac{M}{12} h (2x_{i+1}x_i - x_{i+1}^2 - x_i^2) = \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \mp \frac{M}{12} h^3. \end{aligned}$$

Podle 6.1.2 a 5.2.6 platí

$$\frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) - \frac{M}{12} h^3 \leq \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \leq \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) + \frac{M}{12} h^3.$$

Sečtením těchto nerovností pro n od 0 do $n-1$ a s využitím 5.2.13.2 dostaneme

$$\begin{aligned} & \frac{h}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) - \frac{M}{12} h^3 n \leq \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx \leq \\ & \leq \frac{h}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) + \frac{M}{12} h^3 n, \end{aligned}$$

což je tvrzení. \square

Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{M(b-a)^3}{12n^2} = 0$, je podle 1.3.7 $\lim_{n \rightarrow \infty} I_n(f, a, b) = \int_a^b f(x) dx$.

6.1.4 Věta (Simpsonovo [1710 – 1761] pravidlo)

Buď f funkce definovaná na intervalu $[a, b]$, která má na intervalu (a, b) ohraničenou čtvrtou derivaci a buď $m \in \mathbb{N}$ sudé. Označme

$$h = \frac{b-a}{m},$$

$$x_i = a + ih, \quad i = 0, 1, 2, \dots, m,$$

$$J_m(f, a, b) = \frac{h}{3}(f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 4f(x_{m-1}) + f(x_m)),$$

$$N = \sup\{|f^{(4)}(x)| : x \in (a, b)\}.$$

Pak

$$\left| J_m(f, a, b) - \int_a^b f(x) dx \right| \leq \frac{N}{180} \frac{(b-a)^5}{m^4}.$$

Myšlenka důkazu: Na každém z intervalů $[x_{2k}, x_{2k+2}]$ nahradíme funkci f kvadratickým polynomem

$$P(x) = \frac{(x - x_{2k+1})(x - x_{2k+2})f(x_{2k})}{(x_{2k} - x_{2k+1})(x_{2k} - x_{2k+2})} + \frac{(x - x_{2k})(x - x_{2k+2})f(x_{2k+1})}{(x_{2k+1} - x_{2k})(x_{2k+1} - x_{2k+2})} + \frac{(x - x_{2k})(x - x_{2k+1})f(x_{2k+2})}{(x_{2k+2} - x_{2k})(x_{2k+2} - x_{2k+1})},$$

pro který platí $f(x_{2k}) = P(x_{2k})$, $f(x_{2k+1}) = P(x_{2k+1})$, $f(x_{2k+2}) = P(x_{2k+2})$. \square

6.1.5 Příklad

Hodnota integrál $\int_0^1 \frac{dx}{1+x}$ vypočítaná pomocí lichoběžníkového pravidla s $n = 8$ je 0.6941; odhadnutá chyba je ≤ 0.003 . Přesná hodnota přitom je 0.6932. Vidíme, že odhad chyby je dosti „opatrný“, skutečná chyba je více než třikrát menší.

Část III

Nekonečné řady

Kapitola 7

Číselné řady

7.1 Pojem řady a jejího součtu

7.1.1 Definice

Nechť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost reálných čísel. Položme

$$\begin{aligned}s_1 &= a_1, \\s_2 &= a_1 + a_2, \\s_3 &= a_1 + a_2 + a_3, \\&\vdots \\s_n &= a_1 + a_2 + \cdots + a_n.\end{aligned}$$

Posloupnost $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ se nazývá *posloupnost částečných součtů nekonečné řady* $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Poznámka: Budeme uvažovat i nekonečné řady tvaru $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=k}^{\infty} a_n$ a p.

Prvky posloupnosti $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ se nazývají *členy řady* $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

7.1.2 Definice

Buď $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ nekonečná řada a $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost jejích částečných součtů.

Jestliže existuje vlastní limita $\lim s_n = s$, řekneme, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *konverguje*, číslo s nazýváme jejím *součtem*

a píšeme $s = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Neexistuje-li vlastní limita $\lim s_n$, řekneme, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *diverguje*. Je-li přitom $\lim s_n = \pm\infty$, řekneme, že

řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *určitě diverguje*, neexistuje-li ani nevlastní $\lim s_n$, řekneme, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *osciluje*.

7.1.3 Příklad — Geometrická řada

$$\sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1} = a + aq + aq^2 + aq^3 + \cdots$$

Členy řady: $a_n = aq^{n-1}$

Částečné součty: $s_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n = a + aq + \cdots + aq^{n-1} = a(1 + q + \cdots + q^{n-1})$

Platí:

$$\begin{aligned}s_{n+1} &= a(1 + q + \dots + q^{n-1} + q^n) = a + aq(1 + q + \dots + q^{n-1}) = a + qs_n \\ s_{n+1} &= a_{n+1} + s_n = aq^n + s_n\end{aligned}$$

Odtud

$$\begin{aligned}aq^n + s_n &= a + qs_n \\ s_n(1 - q) &= a(1 - q^n) \\ s_n &= a \frac{1 - q^n}{1 - q}\end{aligned}$$

Je-li $|q| < 1$, pak $\lim q^n = 0$; je-li $q > 1$, pak $\lim q^n = \infty$; je-li $q \leq -1$, pak neexistuje vlastní ani nevlastní limita posloupnosti $\{q^n\}_{n=1}^\infty$; je-li $q = 1$, nemá předchozí vyjádření smysl a je $s_n = na$.

Celkem: Geometrická řada $\sum_{n=1}^\infty aq^{n-1}$ konverguje pro $|q| < 1$ a má součet $\frac{a}{1-q}$, určitě diverguje pro $q \geq 1$ a osciluje pro $q \leq -1$.

7.1.4 Věta (Cauchyovo - Bolzanovo kritérium)

Řada $\sum_{n=1}^\infty a_n$ konverguje právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0$ a $m \in \mathbb{N}$ platí $|a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m}| < \varepsilon$.

D.: Plyne bezprostředně z 1.3.22. \square

7.1.5 Věta (nutná podmínka konvergence)

Jestliže řada $\sum_{n=1}^\infty a_n$ konverguje, pak $\lim a_n = 0$.

D.: Nechť $\sum_{n=1}^\infty a_n = \lim s_n = s$. Pak $\lim a_n = \lim(s_n - s_{n-1}) = \lim s_n - \lim s_{n-1} = s - s = 0$. \square

Poznámka: Tato podmínka není postačující — $\lim \frac{1}{n} = 0$ ale $\sum_{n=1}^\infty \frac{1}{n}$ určitě diverguje do $+\infty$. Viz 1.1.2.1.

7.1.6 Definice

Budte $\sum_{n=1}^\infty a_n$ nekonečná řada, $n \in \mathbb{N}$ libovolné pevně zvolené. Řada $R_n = \sum_{k=1}^\infty a_{n+k} = a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3} + \dots$ (utvořená vynecháním prvních n členů řady $\sum_{n=1}^\infty a_n$) se nazývá *n-tý zbytek řady* $\sum_{n=1}^\infty a_n$.

7.1.7 Věta

Konverguje-li řada $\sum_{n=1}^\infty a_n$, konverguje i každý její zbytek a platí $\lim R_n = 0$.

Konverguje-li alespoň jeden zbytek řady $\sum_{n=1}^\infty a_n$, konverguje i tato řada.

D.: Nechť $\sum_{n=1}^\infty a_n$ konverguje. Označme $\{\sigma_k\}_{k=1}^\infty$ posloupnost částečných součtů zbytku R_n . Je $\sigma_k = s_{n+k} - s_n$.

Posloupnost $\{s_{n+k}\}_{k=1}^\infty$ konverguje a tedy podle 1.3.6.4 konverguje i $\{\sigma_k\}_{k=1}^\infty$.

Dále $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (\lim_{k \rightarrow \infty} \sigma_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\lim_{k \rightarrow \infty} (s_{n+k} - s_n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (s - s_n) = s - s = 0$.

Konverguje-li R_n , je $R_n \in \mathbb{R}$ a tedy $\sum_{k=1}^\infty a_k = \sum_{k=1}^n a_k + R_n$, což jakožto součet dvou reálných čísel je reálné číslo. \square

7.1.8 Věta (asociativní zákon)

Nechť řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje a necht' $\{n_k\}_{k=1}^{\infty}$ je rostoucí posloupnost přirozených čísel. Označme $n_0 = 0$ a položme

$$b_k = a_{n_{k-1}+1} + a_{n_{k-1}+2} + \dots + a_{n_k}.$$

Pak řada $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ konverguje a platí $\sum_{k=1}^{\infty} b_k = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

D.: Posloupnost částečných součtů řady $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ je vybraná z posloupnosti částečných součtů řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$:

$$\begin{aligned} & a_1 + a_2 + a_3 + \dots = \\ & = (a_1 + a_2 + \dots + a_{n_1}) + (a_{n_1+1} + a_{n_1+2} + \dots + a_{n_2}) + \dots + (a_{n_{k-1}+1} + a_{n_{k-1}+2} + \dots + a_{n_k}) + \dots = \\ & = b_1 + b_2 + \dots + b_k + \dots \end{aligned}$$

Tvrzení nyní plyne z 1.3.14. \square

Poznámka: Předpoklad o konvergenci řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je podstatný:

$1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots$ osciluje, posloupnost částečných součtů je $1, 0, 1, 0, 1, 0, \dots$

$(1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + \dots = 0 + 0 + 0 + \dots = 0$

$1 + (-1 + 1) + (-1 + 1) + (-1 + 1) + \dots = 1 + 0 + 0 + 0 + \dots = 1$

Řada $1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1}$ se nazývá *Grandiho*.

7.1.9 Věta (distributivní zákon)

Nechť řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje a necht' $c \in \mathbb{R}$ je libovolné číslo. Pak konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} ca_n$ a platí

$$\sum_{n=1}^{\infty} ca_n = c \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

D.: Označme s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$

s'_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} ca_n$.

Pak $s'_n = ca_1 + ca_2 + \dots + ca_n = c(a_1 + a_2 + \dots + a_n) = cs_n$. Tvrzení nyní plyne z poznámky za 1.3.6. \square

Poznámka: Komutativní zákon obecně neplatí.

7.1.10 Věta

Konvergují-li řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, pak konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + b_n)$ a platí

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + b_n) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n + \sum_{n=1}^{\infty} b_n.$$

D.: Označme s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$

s'_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$

S_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n + b_n)$.

Pak $S_n = (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) + \dots + (a_n + b_n) = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) + (b_1 + b_2 + \dots + b_n) = s_n + s'_n$.

Tvrzení nyní plyne z 1.3.6.2 \square

7.1.11 Věta

Nechť řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^1, \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2, \dots, \sum_{n=1}^{\infty} a_n^k$ konvergují a necht' c_1, c_2, \dots, c_k jsou reálná čísla. Pak řada

$\sum_{n=1}^{\infty} (c_1 a_n^1 + c_2 a_n^2 + \dots + c_k a_n^k)$ konverguje a platí

$$\sum_{n=1}^{\infty} (c_1 a_n^1 + c_2 a_n^2 + \dots + c_k a_n^k) = c_1 \sum_{n=1}^{\infty} a_n^1 + c_2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 + \dots + c_k \sum_{n=1}^{\infty} a_n^k,$$

neboli

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^k c_m a_n^m = \sum_{m=1}^k c_m \sum_{n=1}^{\infty} a_n^m.$$

D.: Úplnou indukcí z 7.1.9 a 7.1.10. \square

Poznámka: Zejména pro $c_1 = c_2 = \dots = c_k = 1$ dostaneme

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^k a_n^m = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^{\infty} a_n^m.$$

Symbol k v poslední formuli nelze nahradit symbolem ∞ .

7.1.12 Věta (Cauchyova o aritmetických průměrech)

Nechť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost taková, že $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R}^*$. Pak $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = a$.

D.: Označme $b_n = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$.

Připusťme $\limsup_{n \rightarrow \infty} b_n > \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$. Zvolme čísla $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ tak, že

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n < \alpha < \beta < \limsup_{n \rightarrow \infty} b_n.$$

Existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro každé $n \geq n_1$ je $a_n < \alpha$. Pro $n > n_1$ tedy platí

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_{n_1}}{n} + \frac{a_{n_1+1} + a_{n_1+2} + \dots + a_n}{n} < \\ &< \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_{n_1}}{n} + \frac{\alpha(n - n_1)}{n}. \end{aligned}$$

Pro $n \rightarrow \infty$ konverguje pravá strana této nerovnosti k α . To znamená, že existuje $n_2 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_2$ je $b_n \leq \alpha < \beta$. Odtud plyne, že $\limsup_{n \rightarrow \infty} b_n \leq \beta$, což je spor.

Platí tedy $\limsup_{n \rightarrow \infty} b_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$.

Analogicky ukážeme, že $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} b_n$.

Celkem tedy je $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} b_n \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} b_n \leq \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$, z čehož vyplývá tvrzení. \square

7.1.13 Poznámka o sumaci divergentních řad

Oscilujícím řadám jsme dosud nepřirazovali žádný symbol jako jejich součet. Někdy je ale užitečné i takovým řadám nějaký „součet“ přiřadit. Taková zobecněná sumace musí splňovat jisté přirozené podmínky:

- (i) Je-li $\sum a_n = a$ ve smyslu definice 7.1.2, musí být $\sum a_n = a$ v zobecněném smyslu.
- (ii) Je-li $\sum a_n = a$, $\sum b_n = b$ v zobecněném smyslu a α, β jsou reálná čísla, pak $\sum(\alpha a_n + \beta b_n) = \alpha a + \beta b$ v zobecněném smyslu.

Sumace, která splňuje (i) a (ii), se nazývá *regulární*.

Cesàrova [1859 – 1906] metoda (metoda aritmetických průměrů): Necht' $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada a $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost jejích částečných součtů. Jestliže platí $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_n}{n} = a$, pak klademe $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = a$ v Cesàrově smyslu.

Z 7.1.12 plyne, že Cesàrova sumace je regulární.

7.2 Řady s nezápornými členy

$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $a_n \geq 0$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

7.2.1 Věta

Řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ s nezápornými členy buď konverguje nebo určitě diverguje k $+\infty$. Konverguje právě tehdy, když posloupnost jejích částečných součtů je ohraničená.

D.: $s_{n+1} = s_n + a_{n+1} \geq s_n$. Posloupnost částečných součtů je neklesající a tvrzení plyne z 1.3.4, 1.3.9 a 1.3.12.5. \square

Poznámka: Všechna následující tvrzení mohou být formulována se změněnými předpoklady. Místo „pro každé $n \in \mathbb{N}$ “ lze psát „existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ “ (Sr. 7.1.7)

7.2.2 Věta (Integrální Cauchyovo - Maclaurinovo kritérium)

Necht' f je funkce definovaná na $[1, \infty)$, která je zde nezáporná a nerostoucí. Necht' $f(n) = a_n$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje právě tehdy, když konverguje nevlastní integrál $\int_1^{\infty} f(x) dx$.

D.: Poněvadž je f na $[1, \infty)$ monotónní, je podle 5.1.11 integrabilní na $[1, b]$ pro každé $b > 1$.

Označme $J_n = \int_1^n f(x) dx$.

Pro každé $x \in [i, i+1]$, $i \in \mathbb{N}$ platí $a_i = f(i) \geq f(x) \geq f(i+1) = a_{i+1}$ a tedy

$$a_i = \int_i^{i+1} a_i dx \geq \int_i^{i+1} f(x) dx \geq \int_i^{i+1} a_{i+1} dx = a_{i+1}.$$

Sečtením těchto nerovností pro $i = 1, 2, \dots, n-1$ dostaneme

$$a_1 + a_2 + \dots + a_{n-1} = s_{n-1} \geq \int_1^n f(x) dx = J_n \geq a_2 + a_3 + \dots + a_n = s_n - a_1,$$

neboli

$$s_n - a_1 \leq J_n \leq s_{n-1}.$$

Necht' $\int_1^{\infty} f(x) dx$ konverguje. Pak podle 2.1.4 konverguje posloupnost $\{J_n\}$ a tedy podle 1.3.4 je ohraničená. Existuje $K \in \mathbb{R}$, že $J_n \leq K$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. Celkem $s_n \leq K + a_1$, je shora ohraničená a neklesající, tedy konvergentní (podle 1.3.9) a podle 7.2.1 je i $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konvergentní.

Necht' $\int_1^{\infty} f(x) dx$ diverguje. Poněvadž f je nezáporná, je funkce $F(t) = \int_1^t f(x) dx$ neklesající a tedy $\int_1^{\infty} f(x) dx = \infty$. Odtud $\lim J_n = \infty$ a také podle poznámky za 1.3.11 $\lim s_{n-1} = \lim s_n = \infty$. \square

7.2.3 Příklad

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^k}$$

konverguje pro $k > 1$ a diverguje pro $k \leq 1$. (Viz 5.4.2.)

7.2.4 Věta (první srovnávací kriterium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ jsou řady s nezápornými členy a necht' pro všechna $n \in \mathbb{N}$ platí $a_n \leq b_n$. Pak platí:

Konverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$; diverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, diverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$.

D.: Označme s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$
 s'_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$.

Pak $s_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n \leq b_1 + b_2 + \dots + b_n = s'_n$.

Je-li $\lim s'_n = b < \infty$, pak pro všechna $n \in \mathbb{N}$ platí $s_n \leq s'_n \leq b$, neboť posloupnost $\{s'_n\}_{n=1}^{\infty}$ je neklesající.

Posloupnost $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ je také neklesající a je shora ohraničená, což podle 1.3.9 znamená, že je konvergentní.

Je-li $\lim s_n = \infty$, je podle poznámky za 1.3.11 také $\lim s'_n = \infty$. \square

7.2.5 Definice

Budte $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ řady s nezápornými členy. Je-li $a_n \leq b_n$ pro všechna $n \in \mathbb{N}$, nazývá se řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ *majorantou* řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ se nazývá *minorantou* řady $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$.

Větu 7.2.4 lze přeformulovat: S konvergentní řadou s nezápornými členy konverguje i každá její minoranta, s divergentní řadou s nezápornými členy diverguje i každá její majoranta.

7.2.6 Věta (limitní srovnávací kriterium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada s nezápornými, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ řada s kladnými členy a necht' existuje $\lim \frac{a_n}{b_n} = c \in \mathbb{R}^*$. Pak platí:

Je-li $c < \infty$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konverguje, pak konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Je-li $c > 0$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ diverguje, pak diverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

D.: Necht' $c < \infty$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konverguje. Posloupnost $\left\{ \frac{a_n}{b_n} \right\}_{n=1}^{\infty}$ je podle 1.3.4 ohraničená, existuje tedy

$K \in \mathbb{R}$, že pro všechna $n \in \mathbb{N}$ je $\frac{a_n}{b_n} \leq K$, neboli $a_n \leq K b_n$. Řada $\sum_{n=1}^{\infty} K b_n$ je podle 7.1.9 konvergentní,

takže podle 7.2.4 je konvergentní i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Necht' $c > 0$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje. K $\varepsilon \in (0, c) > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0$ je

$\frac{a_n}{b_n} > c - \varepsilon > 0$. Položme $k = \min \left\{ \frac{a_1}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}, \dots, \frac{a_{n_0}}{b_{n_0}}, c - \varepsilon \right\}$. Pak pro všechna $n \in \mathbb{N}$ je $\frac{a_n}{b_n} \geq k$, neboli

$a_n \geq k b_n$. Kdyby řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konvergovala, pak by podle 7.1.9 a 7.2.4 konvergovala i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, což by byl spor. \square

Důsledek: Buďte $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ řady s kladnými členy. Jestliže existuje $\lim \frac{a_n}{b_n} \in (0, \infty)$, pak řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ současně konvergují nebo divergují.

7.2.7 Věta (odmocninové (Cauchyovo) kritérium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada s nezápornými členy. Existuje-li takové $q \in [0, 1)$, že pro všechna $n \in \mathbb{N}$ platí $\sqrt[n]{a_n} \leq q$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje. Platí-li pro nekonečně mnoho indexů n nerovnost $\sqrt[n]{a_n} \geq 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ určitě diverguje.

D.: Je-li $\sqrt[n]{a_n} \leq q$, pak $a_n \leq q^n$ a první tvrzení plyne z 7.2.4 a 7.1.3.
Je-li $\sqrt[n]{a_n} \geq 1$ pro nekonečně mnoho indexů n , pak $a_n \geq 1$ pro nekonečně mnoho indexů n a nemůže být $\lim a_n = 0$. Druhé tvrzení tedy plyne z 7.1.5 a 7.2.1. \square

7.2.8 Věta (limitní odmocninové kritérium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada s nezápornými členy a nechť existuje $\lim \sqrt[n]{a_n} = c \in \mathbb{R}^*$.

Je-li $c < 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, je-li $c > 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ určitě diverguje.

D.: Nechť $c < 1$ a buď $\varepsilon \in (0, 1 - c)$. Pak existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\sqrt[n]{a_n} < c + \varepsilon < 1$. První tvrzení plyne z 7.2.7 a 7.1.7.

Nechť $c > 1$ a buď $\varepsilon \in (0, c - 1)$. Pak existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\sqrt[n]{a_n} > c - \varepsilon > 1$. Druhé tvrzení plyne z 7.2.7. \square

7.2.9 Věta (druhé srovnávací kritérium)

Buďte $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ řady s kladnými členy a nechť pro všechna $n \in \mathbb{N}$ je $\frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \frac{b_{n+1}}{b_n}$. Pak platí:

Konverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$; diverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, diverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$.

D.: $0 < \frac{a_2}{a_1} \leq \frac{b_2}{b_1}$, $0 < \frac{a_3}{a_2} \leq \frac{b_3}{b_2}$, ..., $0 < \frac{a_n}{a_{n-1}} \leq \frac{b_n}{b_{n-1}}$.

Vynásobením těchto nerovností dostaneme $0 < \frac{a_n}{a_1} \leq \frac{b_n}{b_1}$, neboli $a_n \leq \frac{a_1}{b_1} b_n$.

Konverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$, konverguje podle 7.1.9 i řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_1}{b_1} b_n$ a tedy podle 7.2.4 konverguje řada

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Nechť řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje. Kdyby řada $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ konvergovala, pak by podle již dokázané části věty řada

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$$
 konvergovala a to by byl spor. \square

7.2.10 Věta (podílové (d'Alembertovo [1717 – 1783]) kritérium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada s kladnými členy. Existuje-li takové $q \in [0, 1)$, že pro všechna $n \in \mathbb{N}$ platí nerovnost

$\frac{a_{n+1}}{a_n} \leq q$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje. Platí-li pro všechna $n \in \mathbb{N}$ nerovnost $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje.

D.: $\frac{a_{n+1}}{a_n} \leq q = \frac{q^{n+1}}{q^n}$ a první tvrzení plyne z 7.2.9 a 7.1.3.

Je-li $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq 1$, pak $a_{n+1} \geq a_n$, posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je kladná a neklesající, nemůže tedy být $\lim a_n = 0$.

Druhé tvrzení plyne z 7.1.5. \square

7.2.11 Věta (limitní podílové kriterium)

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je řada s kladnými členy a necht' existuje $\lim \frac{a_{n+1}}{a_n} = c \in \mathbb{R}^*$.

Je-li $c < 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, je-li $c > 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ určitě diverguje.

D.: Necht' $c < 1$ a buď $\varepsilon \in (0, 1 - c)$. Pak existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\frac{a_{n+1}}{a_n} < c + \varepsilon < 1$. První tvrzení plyne z 7.2.10 a 7.1.7.

Necht' $c > 1$ a buď $\varepsilon \in (0, c - 1)$. Pak existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\frac{a_{n+1}}{a_n} > c - \varepsilon$, tedy $a_{n+1} > (c - \varepsilon)a_n > a_n$, posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je kladná a rostoucí, nemůže tedy být $\lim a_n = 0$. Druhé tvrzení plyne z 7.1.5. \square

7.2.12 Lemma

Buď $\{a_n\}$ posloupnost kladných čísel. Jestliže $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = a \in \mathbb{R}^*$, pak $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = a$.

D.: Ukážeme, že $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = a$.

Je-li $a = \infty$, je tvrzení triviální.

Necht' $a < \infty$ a zvolme $b \in \mathbb{R}$, $b > a$. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ je $\frac{a_{n+1}}{a_n} < b$. Tedy

$$\frac{a_{n_0+1}}{a_{n_0}} < b, \frac{a_{n_0+2}}{a_{n_0+1}} < b, \dots, \frac{a_n}{a_{n-1}} < b,$$

z čehož vynásobením dostaneme

$$\frac{a_n}{a_{n_0}} < b^{n-n_0}.$$

Odtud

$$\sqrt[n]{a_n} < \sqrt[n]{a_{n_0}} b^{\frac{n-n_0}{n}}.$$

Ze spojitosti exponenciální funkce plyne

$$\lim_{n \rightarrow \infty} b^{\frac{n-n_0}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} b^{1-\frac{n_0}{n}} = b.$$

Dále

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_{n_0}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{1}{n} \ln a_{n_0}} = 1.$$

Celkem tedy $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq b$.

Poněvadž $b > a$ bylo libovolné, je $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq a$.

Analogicky ukážeme $\liminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = a$, takže celkem $a \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq a$. \square

Z lemma plyne: pokud lze dokázat konvergenci řady s nezápornými členy pomocí podílového kriteria, pak ji lze dokázat i pomocí kriteria odmocninového. Podílové kriterium tedy není silnější, než odmocninové.

7.2.13 Další kritéria konvergence

Bud' $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ řada s kladnými členy.

1. Logaritmické kritérium:

Nechť existuje $\lim \frac{\ln a_n}{\ln n} = c$. Je-li $c < -1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, je-li $c > -1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje.

2. Raabeovo kritérium:

Nechť existuje $\lim n \left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1 \right) = c$. Je-li $c > 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, je-li $c < 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje.

3. Gaussovo [1777 – 1855] kritérium:

Nechť existuje $\varepsilon > 0$ a ohraničená posloupnost $\{\Theta_n\}_{n=1}^{\infty}$ takové že

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = \lambda + \frac{\mu}{n} + \frac{\Theta_n}{n^{1+\varepsilon}}.$$

Je-li $\lambda > 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje.

Je-li $\lambda < 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje.

Je-li $\lambda = 1$ a $\mu > 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje.

Je-li $\lambda = 1$ a $\mu \leq 1$, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverguje.

7.3 Řady absolutně a neabsolutně konvergentní

7.3.1 Věta

Bud' $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost. Jestliže konverguje řada $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$, pak konverguje i řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

D.: Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ konverguje a bud' $\varepsilon > 0$ libovolné.

Podle 7.1.4 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $m \in \mathbb{N}$ a $n \geq n_0$ platí

$$| |a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}| | = |a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}| < \varepsilon \text{ a tedy}$$

$$|a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m}| \leq |a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}| < \varepsilon, \text{ což podle 7.1.4 znamená, že}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ konverguje. } \square$$

7.3.2 Definice

Bud' $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost. Řekneme, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje absolutně, jestliže konverguje řada $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$.

Řekneme, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje neabsolutně (relativně), jestliže konverguje, avšak řada $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ určitě diverguje.

7.3.3 Poznámky

1. Jestliže konverguje řada s nezápornými (nekladnými) členy, pak konverguje absolutně.

2. Poněvadž řada $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ má nezáporné členy, platí pro absolutní konvergenci analogická kritéria jako v 7.2.

3. Konverguje-li řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ neabsolutně, pak má podle 7.1.7 nekonečně mnoho kladných a nekonečně mnoho záporných členů.

7.3.4 Věta

Jestliže řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje absolutně, pak $\left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$.

D.: Označme s_n posloupnost částečných součtů řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a S_n posloupnost částečných součtů řady $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$.

Pak $|s_n| = |a_1 + a_2 + \dots + a_n| \leq |a_1| + |a_2| + \dots + |a_n| = S_n$. Podle 1.3.6.1 a 1.3.5.1 je

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} a_n \right| = \left| \lim_{n \rightarrow \infty} s_n \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} |s_n| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|. \quad \square$$

7.3.5 Věta

Jestliže řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje absolutně a $\{c_n\}_{n=1}^{\infty}$ je ohraničená posloupnost, pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} c_n a_n$ konverguje absolutně.

D.: Existuje $k \in \mathbb{R}$, že $|c_n| < k$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 7.1.4 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ a každé $m \in \mathbb{N}$ platí $|a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}| < \frac{\varepsilon}{k}$. Tedy také

$$\begin{aligned} |c_{n+1}a_{n+1}| + |c_{n+2}a_{n+2}| + \dots + |c_{n+m}a_{n+m}| &= |c_{n+1}| |a_{n+1}| + |c_{n+2}| |a_{n+2}| + \dots + |c_{n+m}| |a_{n+m}| < \\ < k|a_{n+1}| + k|a_{n+2}| + \dots + k|a_{n+m}| = k(|a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}|) < k \frac{\varepsilon}{k} = \varepsilon, \end{aligned}$$

a tedy podle 7.1.4 řada $\sum_{n=1}^{\infty} c_n a_n$ konverguje. \square

7.3.6 Definice

Řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ se nazývá *alternující*, jestliže platí $a_n a_{n+1} < 0$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. (T.j. členy řady střídají znaménka.)

Je-li $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost kladných čísel, pak jsou řady $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$ alternující.

7.3.7 Věta (Leibnizovo [1646 – 1716] kriterium)

Nechť $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nerostoucí posloupnost kladných čísel. Alternující řada $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$ konverguje právě tehdy, když $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

D.: Nutnost plyne z 7.1.5.

Nechť $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

Poněvadž $\{a_n\}$ je nerostoucí posloupnost kladných čísel, pro každé $k \in \mathbb{N}$ platí $a_k - a_{k+1} \geq 0$.

Pro všechna $n \in \mathbb{N}$ a každé $m \in \mathbb{N}$ sudé platí

$$\begin{aligned} 0 &\leq (a_{n+1} - a_{n+2}) + (a_{n+3} - a_{n+4}) + \dots + (a_{n+m-1} - a_{n+m}) = \\ &= a_{n+1} - (a_{n+2} - a_{n+3}) - \dots - (a_{n+m-2} - a_{n+m-1}) - a_{n+m} \leq \\ &\leq a_{n+1}, \end{aligned}$$

a pro všechna $n \in \mathbb{N}$ a každé $m \in \mathbb{N}$ liché platí

$$\begin{aligned} 0 &\leq (a_{n+1} - a_{n+2}) + (a_{n+3} - a_{n+4}) + \dots + (a_{n+m-2} - a_{n+m-1}) + a_{n+m} = \\ &= a_{n+1} - (a_{n+2} - a_{n+3}) - (a_{n+4} - a_{n+5}) - \dots - (a_{n+m-1} - a_{n+m}) \leq \\ &\leq a_{n+1}. \end{aligned}$$

Tedy pro všechna $n, m \in \mathbb{N}$ platí

$$0 \leq a_{n+1} - a_{n+2} + a_{n+3} - a_{n+4} + \cdots + (-1)^{m-1} a_{n+m} \leq a_{n+1}.$$

Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ platí $a_n < \varepsilon$. Pro libovolné $n \geq n_0$ a každé $m \in \mathbb{N}$ tedy platí

$$\begin{aligned} & |(-1)^n a_{n+1} + (-1)^{n+1} a_{n+2} + \cdots + (-1)^{n+m-1} a_{n+m}| = \\ & = |(-1)^n |a_{n+1} - a_{n+2} + a_{n+3} - a_{n+4} + \cdots + (-1)^{m-1} a_{n+m}| = \\ & = a_{n+1} - a_{n+2} + a_{n+3} - a_{n+4} + \cdots + (-1)^{m-1} a_{n+m} \leq a_{n+1} < \varepsilon, \end{aligned}$$

což podle 7.1.4 znamená, že řada $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$ konverguje. \square

7.3.8 Příklad

Leibnizova řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n}$ konverguje.

Poněvadž podle 1.1.2.1 řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ diverguje, konverguje Leibnizova řada neabsolutně.

7.3.9 Poznámka

Předpoklad, že $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nerostoucí posloupnost, nelze v 7.3.7 vynechat.

Například řada

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2 + (-1)^n}{n} = -1 + \frac{3}{2} - \frac{1}{3} + \frac{3}{4} - \frac{1}{5} + \frac{3}{6} - \cdots - \frac{1}{2n+1} + \frac{3}{2n+2} - \cdots$$

diverguje. Kdyby tato řada konvergovala, pak by podle 7.1.8 konvergovala také řada

$$\left(-1 + \frac{3}{2}\right) + \left(-\frac{1}{3} + \frac{3}{4}\right) + \left(-\frac{1}{5} + \frac{3}{6}\right) + \cdots + \left(-\frac{1}{2n+1} + \frac{3}{2n+2}\right) + \cdots = \frac{1}{2} + \frac{5}{12} + \frac{9}{30} + \cdots + \frac{4n+1}{4n^2+6n+2} + \cdots,$$

avšak podle 7.2.6 řada $\sum_{n=0}^n \frac{4n+1}{4n^2+6n+2}$ diverguje, neboť

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{4n+1}{4n^2+6n+2}}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4n^2+n}{4n^2+6n+2} = 1$$

a harmonická řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ podle 7.2.3 diverguje.

7.3.10 Další kritéria neabsolutní konvergence

1. Dirichletovo [1805 – 1859] kritérium

Nechť $\{c_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nerostoucí posloupnost nezáporných čísel s $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$ a nechť posloupnost částečných

součtů řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je ohraničená. Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} c_n a_n$ konverguje.

2. Abelovo [1802 – 1829] kritérium

Nechť řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje a $\{c_n\}_{n=1}^{\infty}$ je monotónní ohraničená posloupnost. Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} c_n a_n$ konverguje.

7.3.11 Definice

Nechť $\{\lambda_n\}_{n=1}^{\infty}$ je permutace množiny \mathbb{N} (posloupnost přirozených čísel taková, že každé číslo se v ní vyskytuje právě jednou) a necht' $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je nekonečná řada. Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\lambda_n}$ se nazývá *přeřazením řady* $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$. (Řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\lambda_n}$ vznikla z řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ přeřazením.)

Například: $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots$
 $a_2 + a_1 + a_4 + a_3 + a_6 + a_5 + \dots$
 $a_1 + a_3 + a_2 + a_5 + a_7 + a_4 + a_9 + a_{11} + a_6 + \dots$

7.3.12 Definice

Řekneme, že pro konvergentní řadu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ platí *komutativní zákon*, jestliže každá řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\lambda_n}$ vzniklá z této řady přeřazením konverguje a má týž součet.

Řada, pro niž platí komutativní zákon, se nazývá *bezpodmínečně konvergentní*, řada, pro niž neplatí komutativní zákon, se nazývá *podmínečně konvergentní*.

7.3.13 Věta

Pro absolutně konvergentní řadu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ platí komutativní zákon, t.j. absolutně konvergentní řada je bezpodmínečně konvergentní.

D.: Necht' $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ konverguje a buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

Podle 7.1.4 existuje $r \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq r$, $m \in \mathbb{N}$ platí $|a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \dots + |a_{n+m}| < \varepsilon$.

Čísla $1, 2, \dots, r$ se vyskytují v permutaci $\{\lambda_n\}_{n=1}^{\infty}$ množiny \mathbb{N} . Poněvadž jich je konečně mnoho, existuje $t \in \mathbb{N}$, že $\{1, 2, \dots, r\} \subseteq \{\lambda_n\}_{n=1}^t$.

Pro libovolné $n \geq t$ a $k \in \mathbb{N}$ platí $|a_{\lambda_{n+1}}| + |a_{\lambda_{n+2}}| + \dots + |a_{\lambda_{n+k}}| \leq |a_{r+1}| + |a_{r+2}| + \dots + |a_{r+m}|$, kde $r + m$ je největší z indexů $\lambda_{n+1}, \lambda_{n+2}, \dots, \lambda_{n+k}$. Tedy $|a_{\lambda_{n+1}}| + |a_{\lambda_{n+2}}| + \dots + |a_{\lambda_{n+k}}| < \varepsilon$ a podle 7.1.4

řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\lambda_n}$ konverguje absolutně.

Označme s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a S_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_{\lambda_n}$. Pro $n \geq \max\{r, t\}$ platí

$$|s_n - S_n| = |a_1 + a_2 + \dots + a_r + a_{r+1} + a_{r+2} + \dots + a_n - (a_{\lambda_1} + a_{\lambda_2} + \dots + a_{\lambda_n})| \leq$$

$$\leq |a_{r+1}| + |a_{r+2}| + \dots + |a_{r+m}| < \varepsilon,$$

tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} (s_n - S_n) = 0$, což znamená $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n$. \square

7.3.14 Lemma

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je neabsolutně konvergentní řada. Pak řada sestavená z jejích kladných (resp. záporných) členů je určitě divergentní k $+\infty$ (resp. k $-\infty$).

D.: Necht' $\sum_{n=1}^{\infty} p_n$ je řada s kladnými členy sestavená z kladných členů řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ a $\sum_{n=1}^{\infty} (-q_n)$ je řada s kladnými členy sestavená ze záporných členů řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$.

Označme s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$,

$$s_n^+ \text{ částečné součty řady } \sum_{n=1}^{\infty} p_n, \quad s_n^- \text{ částečné součty řady } \sum_{n=1}^{\infty} (-q_n).$$

Bud' k, l taková přirozená čísla, že $s_n = s_k^+ - s_l^-$. Přitom $k + l = n$ a pro $n \rightarrow \infty$ také $k \rightarrow \infty, l \rightarrow \infty$. Kdyby $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k^+ \in \mathbb{R}$ a $\lim_{l \rightarrow \infty} s_l^- \in \mathbb{R}$, pak by $|a_1| + |a_2| + \dots + |a_n| = s_k^+ + s_l^-$, z čehož by vyplynulo, že řada

$\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje absolutně.

Kdyby $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k^+ = \infty$ a $\lim_{l \rightarrow \infty} s_l^- \in \mathbb{R}$, pak by podle 1.3.12.2 a 1.3.4 platilo $\lim_{l \rightarrow \infty} s_n = \infty$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ by divergovala.

Kdyby $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k^+ \in \mathbb{R}$ a $\lim_{l \rightarrow \infty} s_l^- = -\infty$, pak by platilo $\lim_{l \rightarrow \infty} s_n = -\infty$ a řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ by divergovala.

Podle 7.2.1 tedy je $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k^+ = \lim_{l \rightarrow \infty} s_l^- = \infty$. \square

7.3.15 Věta (Riemann [1826 – 1866])

Z libovolné neabsolutně konvergentní řady lze vhodným přerazením obdržet řadu konvergentní k libovolnému předem danému číslu, řadu určitě divergentní nebo řadu oscilující.

D.: Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ je neabsolutně konvergentní řada a nechť $\{p_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost jejích kladných členů, $\{-q_n\}_{n=1}^{\infty}$ je posloupnost jejích záporných členů. Podle 7.3.14 jsou řady $\sum_{n=1}^{\infty} p_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} q_n$ určitě divergentní k $+\infty$.

Buď $a \in \mathbb{R}$ libovolné. Buď $n_1 \in \mathbb{N}$ nejmenší číslo s vlastností

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} > a.$$

Buď $m_1 \in \mathbb{N}$ nejmenší číslo s vlastností

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} - q_1 - q_2 - \dots - q_{m_1} < a.$$

Dále buď $n_2 > n_1$ nejmenší číslo s vlastností

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} - q_1 - q_2 - \dots - q_{m_1} + p_{n_1+1} + p_{n_1+2} + \dots + p_{n_2} > a$$

a $m_2 > m_1$ nejmenší číslo s vlastností

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} - q_1 - q_2 - \dots - q_{m_1} + p_{n_1+1} + p_{n_1+2} + \dots + p_{n_2} - q_{m_1+1} - q_{m_1+2} - \dots - q_{m_2} < a.$$

Atd.

Výsledkem je jistá řada vzniklá přerazením řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$. Nechť $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ je její posloupnost částečných součtů.

Je-li $s_n > a$, pak $s_n - a <$ poslední kladný člen.

Je-li $s_n < a$, pak $s_n - a >$ poslední záporný člen.

Tedy $q_l < s_n - a < p_k$ pro vhodná k, l .

Poněvadž $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, je podle 7.1.5 $\lim_{l \rightarrow \infty} q_l = \lim_{k \rightarrow \infty} p_k = 0$ a tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = a$.

Dále ukážeme, že řadu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ lze přeradit tak, aby vzniklá řada divergovala k $+\infty$.

Buď $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} > 1.$$

Buď $n_2 \in \mathbb{N}$, $n_2 > n_1$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} - q_1 + p_{n_1+1} + p_{n_1+2} + \dots + p_{n_2} > 2.$$

Buď $n_3 \in \mathbb{N}$, $n_3 > n_2$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \dots + p_{n_1} - q_1 + p_{n_1+1} + p_{n_1+2} + \dots + p_{n_2} - q_2 + p_{n_2+1} + p_{n_2+2} + \dots + p_{n_3} > 3.$$

Atd.

Výsledkem je řada určitě divergující k $+\infty$.

Analogicky lze ukázat, že řadu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ lze přeradit tak, aby vzniklá řada divergovala k $-\infty$.

Nakonec řadu $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ přeradíme tak, aby výsledkem byla řada oscilující.

Bud' $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_{n_1} > 1.$$

Bud' $m_1 \in \mathbb{N}$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_{n_1} - q_1 - q_2 - \cdots - q_{m_1} < -1.$$

Bud' $n_2 \in \mathbb{N}$, $n_2 > n_1$ takové, že

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_{n_1} - q_1 - q_2 - \cdots - q_{m_1} + p_{n_1+1} + p_{n_1+2} + \cdots + p_{n_2} > 1.$$

Atd.

Výsledkem je oscilující řada. \square

Z Riemannovy věty plyne, že neabsolutně konvergentní řada je podmíněně konvergentní.

7.4 Dvojně řady

7.4.1 Definice

Zobrazení $f : \mathbb{N}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ se nazývá *dvojná posloupnost*.

Zápis: $f(m, n) = f_{mn}$, nebo a_{mn} , b_{mn} , ...
 $\{a_{mn}\}_{m,n=1}^{\infty}$, stručně $\{a_{mn}\}$

Čísla a_{mn} se nazývají *členy* této posloupnosti. Lze je uspořádat do schématu (nekonečné matice):

$$\begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{array}$$

7.4.2 Poznámky

Snadno lze definovat ohraničenost dvojně posloupnosti: Existují konstanty $k, K \in \mathbb{R}$ že pro všechna $m, n \in \mathbb{N}$ je $k \leq a_{mn} \leq K$.

Nelze definovat monotonnost dvojně posloupnosti. Lze definovat monotonnost vzhledem k jednomu indexu: $\{a_{mn}\}_{m,n=1}^{\infty}$ je monotonní vzhledem k druhému indexu, je-li posloupnost $\{a_{mn}\}_{n=1}^{\infty}$ monotonní pro každé $m \in \mathbb{N}$.

7.4.3 Definice

Řekneme, že dvojná posloupnost $\{a_{mn}\}_{m,n=1}^{\infty}$ má limitu $a \in \mathbb{R}$, jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ existují čísla $m_0, n_0 \in \mathbb{N}$ taková, že pro každá dvě $m, n \in \mathbb{N}$, $m \geq m_0$, $n \geq n_0$ platí $|a_{mn} - a| < \varepsilon$.

Píšeme $\lim_{m,n \rightarrow \infty} a_{mn} = a$, $\lim a_{mn} = a$, $a_{mn} \rightarrow a$.

Má-li posloupnost $\{a_{mn}\}$ limitu $a \in \mathbb{R}$, řekneme, že je *konvergentní*.

7.4.4 Poznámky

1. Analogicky lze definovat nevlastní limity dvojně posloupnosti.
2. Některé věty o limitách posloupnosti lze snadno přenést na dvojně posloupnosti. Zejména [1.3.3](#), [1.3.5.1–3](#), [1.3.6](#) a [1.3.7](#).

3. Konvergentní dvojná posloupnost nemusí být ohraničená.

$$\begin{array}{ccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & \\ & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & \\ \text{Například} & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & \text{ má limitu 1 a není ohraničená.} \\ & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \end{array}$$

7.4.5 Věta (Cauchyovo - Bolzanovo kritérium)

Dvojná posloupnost $\{a_{mn}\}$ konverguje právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé dvě dvojice $(m, n), (p, q) \in \mathbb{N}^2$ takové, že $m \geq n_0, n \geq n_0, p \geq n_0, q \geq n_0$ platí $|a_{mn} - a_{pq}| < \varepsilon$.

D.: „ \Rightarrow “ Triviální (analogicky jako 1.3.22).

„ \Leftarrow “ Položme $b_n = a_{nn}$ (diagonální posloupnost). $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská, existuje tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = a \in \mathbb{R}$.

Ukážeme, že také $\lim_{m, n \rightarrow \infty} a_{mn} = a$. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $m \geq n_1, n \geq n_1, p \geq n_1, q \geq n_1$ platí $|a_{mn} - a_{pq}| < \frac{\varepsilon}{2}$.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ platí $|b_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Pro každé $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí

$$|a_{mn} - a| = |a_{mn} - a_{nn} + b_n - a| \leq |a_{mn} - a_{nn}| + |b_n - a| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \quad \square$$

7.4.6 Definice

Buď $\{a_{mn}\}_{m, n=1}^{\infty}$ dvojná posloupnost a položme

$$s_{mn} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{\substack{i \leq m \\ j \leq n}} a_{ij}.$$

Dvojná posloupnost $\{s_{mn}\}$ se nazývá *posloupnost částečných součtů dvojných řad* $\sum_{m, n=1}^{\infty} a_{mn} = \sum a_{mn}$.

Řekneme, že dvojná řada $\sum a_{mn}$ konverguje a má součet s , jestliže $\lim_{m, n \rightarrow \infty} s_{mn} = s \in \mathbb{R}$. Řekneme, že tato dvojná řada určitě diverguje k ∞ (k $-\infty$), jestliže $\lim_{m, n \rightarrow \infty} s_{mn} = \infty$ ($\lim_{m, n \rightarrow \infty} s_{mn} = -\infty$).

7.4.7 Poznámky

Snadno lze dokázat následující tvrzení:

1. Nutná podmínka konvergence dvojných řad $\sum_{m, n=1}^{\infty} a_{mn}$ je $\lim_{m, n \rightarrow \infty} a_{mn} = 0$.

$$(a_{mn} = s_{mn} - s_{m-1n} - s_{m n-1} + s_{m-1 n-1})$$

2. Cauchyovo - Bolzanovo kritérium:

Dvojná řada $\sum_{m, n=1}^{\infty} a_{mn}$ konverguje právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé dvě dvojice $(m, n), (p, q) \in \mathbb{N}^2$ takové, že $m \geq n_0, n \geq n_0$ platí

$$\left| \sum_{\substack{n \leq i \leq n+p \\ m \leq j \leq m+q}} a_{ij} \right| < \varepsilon.$$

3. Jestliže $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn} = a \in \mathbb{R}$, $\sum_{m,n=1}^{\infty} b_{mn} = b \in \mathbb{R}$, $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$, pak
- $$\sum_{m,n=1}^{\infty} (c_1 a_{mn} + c_2 b_{mn}) = c_1 \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn} + c_2 \sum_{m,n=1}^{\infty} b_{mn}.$$
4. Necht' $a_{mn} \geq 0$ pro všechna $m, n \in \mathbb{N}$. Dvojná řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$ konverguje právě tehdy, když posloupnost jejích částečných součtů je shora ohraničená.
5. Necht' pro všechna $m, n \in \mathbb{N}$ platí $0 \leq a_{mn} \leq b_{mn}$. Potom: konverguje-li řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} b_{mn}$, pak konverguje i řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$; diverguje-li řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$, pak diverguje i řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} b_{mn}$.
6. Konverguje-li řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} |a_{mn}|$, pak konverguje i řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$.

7.4.8 Definice

Řekneme, že dvojná řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$ konverguje absolutně, jestliže konverguje dvojná řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} |a_{mn}|$.

7.4.9 Věta (komutativní zákon pro dvojně řady)

Necht' dvojná řada $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$ konverguje absolutně a necht' $\mathbb{N}^2 = \bigcup_{k \in I} N_k$ je disjunkttní rozklad množiny \mathbb{N}^2 a necht' každá množina N_k je vyjádřena ve tvaru konečné nebo spočetné posloupnosti. Je-li množina N_k nekonečná, pak řada $\sum_{(m,n) \in N_k} a_{mn}$ absolutně konverguje.

Označíme-li $\sum_{(m,n) \in N_k} a_{mn} = z_k$, pak platí $\sum_{k \in I} z_k = \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$. Přitom je-li množina I nekonečná, řada $\sum_{k \in I} z_k$ konverguje absolutně.

Náznač důkazu:

Množinu \mathbb{N}^2 lze vyjádřit jako prostou posloupnost $\{(m_1, n_1), (m_2, n_2), \dots, (m_l, n_l), \dots\}$.

Označíme-li $b_l = a_{m_l, n_l}$, lze řadu $\sum_{l=1}^{\infty} b_l$ považovat za přerážení dvojně řady $\sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$.

Podle 7.3.13 řada $\sum_{l=1}^{\infty} b_l$ konverguje absolutně a platí $\sum_{l=1}^{\infty} b_l = \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}$.

Zřejmě $\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}_k} |a_{mn}| \leq \sum_{m,n=1}^{\infty} |a_{mn}|$ a tedy podle 7.4.7.4 řada $\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}_k} a_{mn}$ konverguje absolutně.

Řadu $\sum_k z_k = \sum_k \left(\sum_{(m,n) \in \mathbb{N}_k} a_{mn} \right)$ lze považovat za přerážení řady $\sum_{l=1}^{\infty} b_l$.

Podle 7.3.13 řada $\sum_k z_k$ konverguje absolutně a platí $\sum_k z_k = \sum_l b_l$.

(Podrobný důkaz viz např. Jarník, Diferenciální počet II, Věta 39) \square

7.4.10 Sumační metody dvojných řad

Konstrukce popsána v předchozí větě se nazývá sumační metoda dvojně řady. Aplikovat sumační metodu na dvojnou řadu $\sum a_{mn}$ znamená

- Množinu \mathbb{N}^2 vyjádřit jako sjednocení konečné nebo spočetné posloupnosti po dvou disjunkttních množin N_k .
- Každou množinu N_k uspořádat do konečné nebo spočetné posloupnosti.

- Utvořit součty (řady) $\sum_{(m,n) \in N_k} a_{mn} = z_k$.
- Utvořit součet (řadu) $\sum_k z_k$.

Jestliže dvojná řada $\sum a_{mn}$ konverguje absolutně, pak konverguje absolutně i každá takto vytvořená řada a platí $\sum a_{mn} = \sum z_k$.

Některé významné sumační metody:

- *Sumace po čtvercích*

$$N_1 = \{(1, 1)\}$$

$$N_2 = \{(2, 1), (2, 2), (1, 2)\}$$

$$N_3 = \{(3, 1), (3, 2), (3, 3), (2, 3), (1, 3)\}$$

⋮

$$\text{Pak } \sum a_{mn} = a_{11} + (a_{21} + a_{22} + a_{12}) + (a_{31} + a_{32} + a_{33} + a_{23} + a_{13}) + \dots$$

- *Sumace po diagonálách*

$$N_1 = \{(1, 1)\}$$

$$N_2 = \{(2, 1), (1, 2)\}$$

$$N_3 = \{(3, 1), (2, 2), (1, 3)\}$$

⋮

$$\text{Pak } \sum a_{mn} = a_{11} + (a_{21} + a_{12}) + (a_{31} + a_{22} + a_{13}) + \dots$$

- *Dvojnásobné řady*

$$N_k = \{(k, 1), (k, 2), (k, 3), \dots\} \text{ (} k\text{-tý řádek)}$$

nebo

$$N_k = \{(1, k), (2, k), (3, k), \dots\} \text{ (} k\text{-tý sloupec)}$$

$$\text{Pak } \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn} = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \right) \text{ nebo } \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{m=1}^{\infty} a_{mn} \right)$$

7.5 Součin řad

7.5.1 Definice

Buďte $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ nekonečné řady. Jejich *součinem* rozumíme dvojnou řadu $\sum_{m,n=1}^{\infty} c_{mn}$, kde $c_{mn} = a_m b_n$.

7.5.2 Věta

Nechť řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n = b$ konvergují absolutně. Pak jejich součin $\sum_{m,n=1}^{\infty} c_{mn}$ konverguje rovněž absolutně

a platí $\sum_{m,n=1}^{\infty} c_{mn} = ab$.

D.: Označme $s = \sum |a_m|$, $t = \sum |b_n|$,

ρ_m částečné součty řady $\sum |a_m|$, σ_n částečné součty řady $\sum |b_n|$,

$\tilde{\rho}_m$ částečné součty řady $\sum a_m$, $\tilde{\sigma}_n$ částečné součty řady $\sum b_n$,

s_{mn} částečné součty dvojných řad $\sum |c_{mn}| = \sum |a_m b_n|$.

$$s_{mn} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_i b_j| = \sum_{i=1}^m |a_i| \sum_{j=1}^n |b_j| = \rho_m \sigma_n \leq st \text{ a podle 7.4.7.4 } \sum |c_{mn}| \text{ konverguje, tedy } \sum c_{mn}$$

konverguje absolutně.

Na dvojnou řadu $\sum c_{mn}$ lze aplikovat sumaci po čtvercích.

Dostaneme $\sum c_{mn} = c_{11} + (c_{21} + c_{22} + c_{12}) + (c_{31} + c_{32} + c_{33} + c_{23} + c_{13}) + \dots$

Částečné součty této řady jsou

$$s_1 = c_{11} = a_1 b_1 = \tilde{\rho}_1 \tilde{\sigma}_1$$

$$s_2 = c_{11} + (c_{21} + c_{22} + c_{12}) = a_1 b_1 + a_2 b_1 + a_2 b_2 + a_1 b_2 = (a_1 + a_2) b_1 + (a_1 + a_2) b_2 = (a_1 + a_2)(b_1 + b_2) = \tilde{\rho}_2 \tilde{\sigma}_2$$

$$\vdots$$

$$s_n = \tilde{\rho}_n \tilde{\sigma}_n \quad \square$$

Aplikací nějaké sumační metody dostaneme konkrétní tvary součinů řad.

Sumace po čtvercích \Rightarrow *Dirichletův součin řad*

$$\begin{aligned} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \right) &= a_1 b_1 + (a_2 b_1 + a_2 b_2 + a_1 b_2) + (a_3 b_1 + a_3 b_2 + a_3 b_3 + a_2 b_3 + a_1 b_3) + \cdots = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \sum_{i=1}^{n-1} b_i + a_n b_n + b_n \sum_{i=1}^{n-1} a_i \right) \end{aligned}$$

Sumace po diagonálách \Rightarrow *Cauchyův součin řad*

$$\begin{aligned} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \right) &= a_1 b_1 + (a_2 b_1 + a_1 b_2) + (a_3 b_1 + a_2 b_2 + a_1 b_3) + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k+1} \\ \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} b_n \right) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \end{aligned}$$

7.5.3 Věta

Nechť $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=1}^{\infty} b_n = b$ jsou konvergentní řady a nechť $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$ je jejich Dirichletův součin. Pak $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$ konverguje a platí $\sum_{n=1}^{\infty} c_n = ab$.

D.: Označíme-li ρ_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$,

σ_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$,

s_n částečné součty řady $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$,

pak analogicky jako v důkazu věty 7.5.2 ukážeme, že $s_n = \rho_n \sigma_n$, z čehož podle 1.3.6.3 vyplyne

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = ab, \text{ tedy } \sum_{n=1}^{\infty} c_n = ab. \quad \square$$

Poznámka: Pro Cauchyův součin podobné tvrzení neplatí:

Položme $a_n = b_n = \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+1}}$. Podle 7.3.7 řady $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$, $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ konvergují.

Nechť $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ je jejich Cauchyův součin, tedy

$$\begin{aligned} c_n &= (-1)^n \left(\frac{1}{\sqrt{1}\sqrt{n+1}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{n-1}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{1}} \right), \\ |c_n| &= \frac{1}{\sqrt{1}\sqrt{n+1}} + \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{n}} + \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{n-1}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{1}} \geq \\ &\geq \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{n+1}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{n+1}} + \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{n+1}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{n+1}\sqrt{n+1}} = \frac{n+1}{n+1} = 1, \end{aligned}$$

takže nemůže platit $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = 0$ a podle 7.1.5 řada $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ nekonverguje.

7.5.4 Věta (Mertens [1840 – 1927])

Nechť řady $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=0}^{\infty} b_n = b$ konvergují a alespoň jedna z nich absolutně. Nechť $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ je jejich Cauchyův součin. Pak $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ konverguje a platí $\sum_{n=0}^{\infty} c_n = ab$.

D.: Nechť $\sum a_n$ konverguje absolutně a označme ρ_n , resp. σ_n , resp. s_n částečné součty řady $\sum a_n$, resp. $\sum b_n$, resp. $\sum c_n$. Pak

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \rho_n &= a, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n &= b, \\ s_n &= a_0 b_0 + (a_0 b_1 + a_1 b_0) + (a_0 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_0) + \cdots + (a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_n b_0) = \\ &= a_0(b_0 + b_1 + \cdots + b_n) + a_1(b_0 + b_1 + \cdots + b_{n-1}) + \cdots + a_n b_0 = \\ &= a_0 \sigma_n + a_1 \sigma_{n-1} + \cdots + a_n \sigma_0 \end{aligned}$$

Označme $\beta_n = \sigma_n - b$. Pak $\sigma_n = b + \beta_n$ a $\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = 0$. Tedy

$$s_n = a_0(b + \beta_n) + a_1(b + \beta_{n-1}) + \cdots + a_n(b + \beta_0) = b(a_0 + a_1 + \cdots + a_n) + a_0 \beta_n + a_1 \beta_{n-1} + \cdots + a_n \beta_0.$$

Označme $\omega_n = a_0 \beta_n + a_1 \beta_{n-1} + \cdots + a_n \beta_0$. Pak $s_n = b \rho_n + \omega_n$. Nyní stačí ukázat, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \omega_n = 0$, neboť $\lim_{n \rightarrow \infty} b \rho_n = b \lim_{n \rightarrow \infty} \rho_n = ab$.

Řada $\sum |a_n|$ konverguje, to znamená, že má ohraničené částečné součty, neboli existuje $m \in \mathbb{R}$, $m > 0$, že

$$|a_0| + |a_1| + \cdots + |a_n| \leq m, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = 0$, to znamená, že posloupnost $\{\beta_n\}_{n=0}^{\infty}$ je ohraničená, neboli existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$, že

$$|\beta_n| < k, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = 0$, k číslu $\frac{\varepsilon}{2m} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro každé $n \geq n_1$ platí

$$|\beta_n| < \frac{\varepsilon}{2m}.$$

$\sum |a_n|$ konverguje, takže podle 7.1.4 k číslu $\frac{\varepsilon}{2k} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro každé $n \geq n_2$ a $p \in \mathbb{N}$ platí

$$|a_{n+1}| + |a_{n+2}| + \cdots + |a_{n+p}| < \frac{\varepsilon}{2k}.$$

Buď $n_0 = \max\{n_1, n_2\}$. Pro libovolné $n > 2n_0$ platí

$$\begin{aligned} |\omega_n| &= |a_0 \beta_n + a_1 \beta_{n-1} + \cdots + a_n \beta_0| \leq \\ &\leq |a_0| |\beta_n| + |a_1| |\beta_{n-1}| + \cdots + |a_{n_0}| |\beta_{n-n_0}| + |a_{n_0+1}| |\beta_{n-n_0-1}| + \cdots + |a_n| |\beta_0| \leq \\ &\leq (|a_0| + |a_1| + \cdots + |a_{n_0}|) \frac{\varepsilon}{2m} + (|a_{n_0+1}| + |a_{n_0+2}| + \cdots + |a_n|) k \leq m \frac{\varepsilon}{2m} + \frac{\varepsilon}{2k} k = \varepsilon, \end{aligned}$$

což znamená $\lim_{n \rightarrow \infty} \omega_n = 0$. \square

7.5.5 Věta (Cesàro [1859 – 1906])

Nechť $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=0}^{\infty} b_n = b$ jsou konvergentní řady a nechť $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ je jejich Cauchyův součin. Je-li $\{s_n\}_{n=0}^{\infty}$ posloupnost částečných součtů řady $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$, pak $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{s_0 + s_1 + \cdots + s_n}{n+1} = ab$.

D.: Označme ρ_n , resp σ_n částečný součet řady $\sum_{n=0}^{\infty} a_n$, resp. $\sum_{n=0}^{\infty} b_n$ a dále $\alpha_n = \rho_n - a$, $\beta_n = \sigma_n - b$. Pak $\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_n = a$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n = b$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = 0$, $\rho_n = a + \alpha_n$, $\sigma_n = b + \beta_n$.
V důkazu věty 7.5.4 jsme ukázali, že $s_n = a_0\sigma_n + a_1\sigma_{n-1} + \dots + a_n\sigma_0$. Odtud plyne

$$\begin{aligned} s_0 + s_1 + \dots + s_n &= a_0\sigma_0 + (a_0\sigma_1 + a_1\sigma_0) + \dots + (a_0\sigma_n + a_1\sigma_{n-1} + \dots + a_n\sigma_0) = \\ &= (a_0 + a_1 + \dots + a_n)\sigma_0 + (a_0 + a_1 + \dots + a_{n-1})\sigma_1 + \dots + a_0\sigma_n = \\ &= (a + \alpha_n)(b + \beta_0) + (a + \alpha_{n-1})(b + \beta_1) + \dots + (a + \alpha_0)(b + \beta_n) = \\ &= (n+1)ab + a(\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_n) + b(\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_n) + \\ &\quad + \alpha_n\beta_0 + \alpha_{n-1}\beta_1 + \dots + \alpha_0\beta_n. \end{aligned}$$

Dále

$$\frac{s_0 + s_1 + \dots + s_n}{n+1} = ab + a \frac{\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_n}{n+1} + b \frac{\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_n}{n+1} + \frac{\alpha_n\beta_0 + \alpha_{n-1}\beta_1 + \dots + \alpha_0\beta_n}{n+1}.$$

Podle 7.1.12 je $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_n}{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha_0 + \alpha_1 + \dots + \alpha_n}{n+1} = 0$.

K dokončení důkazu tedy stačí ukázat, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha_n\beta_0 + \alpha_{n-1}\beta_1 + \dots + \alpha_0\beta_n}{n+1} = 0$.

Posloupnosti $\{\alpha_n\}$, $\{\beta_n\}$ jsou podle 1.3.4 ohraničené, a tedy existuje $k \in \mathbb{R}$, $k > 0$ takové, že $|\alpha_n| \leq k$, $|\beta_n| \leq k$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

Buď nyní $\varepsilon > 0$ libovolné.

K $\frac{\varepsilon}{k} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_1$ je $|\alpha_n| < \frac{\varepsilon}{k}$ a existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ je $|\beta_n| < \frac{\varepsilon}{k}$.

Buď $n_0 = \max\{n_1, n_2\}$. Pro $n > 2n_0$ platí

$$\begin{aligned} &|\alpha_0\beta_n + \alpha_1\beta_{n-1} + \dots + \alpha_{n_0}\beta_{n-n_0} + \alpha_{n_0+1}\beta_{n-n_0-1} + \dots + \alpha_n\beta_0| \leq \\ &(|\alpha_0||\beta_n| + |\alpha_1||\beta_{n-1}| + \dots + |\alpha_{n_0}||\beta_{n-n_0}|) + (|\alpha_{n_0+1}||\beta_{n-n_0-1}| + \dots + |\alpha_n||\beta_0|) < \\ &\left(k \frac{\varepsilon}{k} + k \frac{\varepsilon}{k} + \dots + k \frac{\varepsilon}{k}\right) + \left(\frac{\varepsilon}{k}k + \frac{\varepsilon}{k}k + \dots + \frac{\varepsilon}{k}k\right) = (n+1)\varepsilon. \end{aligned}$$

To znamená, že pro $n > n_0$ je $\frac{\alpha_n\beta_0 + \alpha_{n-1}\beta_1 + \dots + \alpha_0\beta_n}{n+1} < \varepsilon$. \square

Z 7.1.12 a 7.5.5 bezprostředně plyne

7.5.6 Věta (Abel [1802 – 1829])

Buďte $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=0}^{\infty} b_n = b$ konvergentní řady a $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ jejich Cauchyův součin. Jestliže $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ konverguje, pak $\sum_{n=0}^{\infty} c_n = ab$.

Poznámka: Porovnáním s 7.1.13 vidíme, že platí i obecnější tvrzení: Buďte $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a$, $\sum_{n=0}^{\infty} b_n = b$ konvergentní řady. Jestliže jejich Cauchyův součin $\sum_{n=0}^{\infty} c_n$ konverguje v Cesàrově smyslu, pak $\sum_{n=0}^{\infty} c_n = ab$ v Cesàrově smyslu.

7.6 Cvičení

Najděte součty řad

$$1) \frac{1}{1 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 5} + \frac{1}{5 \cdot 7} + \frac{1}{7 \cdot 9} + \dots \quad 2) \frac{1}{3} + \frac{1}{8} + \frac{1}{15} + \frac{1}{24} + \frac{1}{35} + \frac{1}{48} + \dots$$

$$3) \frac{2}{3} + \frac{3}{9} + \frac{4}{27} + \frac{5}{81} + \frac{6}{243} + \dots \quad 4) 1 + q \cos \alpha + q^2 \cos 2\alpha + q^3 \cos 3\alpha + \dots$$

Rozhodněte o konvergenci řad

$$\begin{array}{llll}
5) \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt[n]{\frac{1}{1000}} & 6) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1000n+1} & 7) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{n+1}} & 8) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{n^n} \\
9) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3^n n!}{n^n} & 10) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^{n(n-1)} & 11) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^5}{2^n+3^n} & 12) \sum_{n=2}^{\infty} \ln\left(1 + \frac{(-1)^n}{n}\right)
\end{array}$$

13) Dokažte, že řada převrácených hodnot členů aritmetické posloupnosti diverguje.

Výsledky: 1) $\frac{1}{2}$ 2) $\frac{3}{4}$ 3) $\frac{5}{4}$ 4) $\frac{1-q \cos \alpha}{1-2q \cos \alpha + q^2}$ 5)diverguje 6)diverguje 7)konverguje 8)konverguje 9)diverguje 10)konverguje 11)konverguje 12)konverguje

7.7 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definiční x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladech, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 8

Řady funkcí

8.1 Posloupnosti a řady funkcí

8.1.1 Definice

Nechť $f_n, n \in \mathbb{N}$ a f jsou reálné funkce takové, že $\text{Dom } f \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$.

Řekneme, že posloupnost funkcí $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ *bodově konverguje k funkci f na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$* a píšeme $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f$, jestliže pro každé $x \in M$ číselná posloupnost $\{f_n(x)\}$ konverguje k $f(x)$, neboli když pro každé $x \in M$ je $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$.

Množina $\left\{x \in \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n : \{f_n(x)\} \text{ konverguje}\right\}$, se nazývá *obor bodové konvergence posloupnosti funkcí $\{f_n\}$* .

Posloupnost funkcí $\{f_n\}$ bodově konverguje k funkci f na množině M , jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ a každému $x \in M$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ je $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$.

Všimněme si, že číslo n_0 závisí na ε i na x .

Má-li každá z funkcí posloupnosti $\{f_n\}$ nějakou vlastnost, limitní funkce $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$ tutéž vlastnost mít může, ale nemusí.

- Jsou-li všechny funkce f_n nezáporné (nekladné), je i funkce f nezáporná (nekladná).
- Jsou-li všechny funkce f_n neklesající (nerostoucí), je i funkce f neklesající (nerostoucí).
- Jsou-li všechny funkce f_n klesající (rostoucí), nemusí být funkce f klesající (rostoucí).
Např. $f_n(x) = \frac{x}{n}$, $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x}{n} = 0$
- Jsou-li všechny funkce f_n ohraničené, nemusí být funkce f ohraničená.
Např. $f_n(x) = \frac{n}{nx+1}$ na intervalu $(0, \infty)$, $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \frac{1}{x}$
- Jsou-li všechny funkce f_n spojité, nemusí být funkce f spojitá.
Např. $f_n(x) = x^{2n}$, $x \in [-1, 1]$, $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \begin{cases} 0, & x \in (-1, 1) \\ 1, & |x| = 1 \end{cases}$

8.1.2 Definice

Řekneme, že posloupnost funkcí $\{f_n\}$ *konverguje stejnoměrně na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ k funkci f* a píšeme

$f_n \rightrightarrows f$, jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro každé $n \geq n_0$ a každé $x \in M$ platí $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$.

Všimněme si, že číslo n_0 závisí pouze na ε .

Jestliže posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje na množině M k funkci f stejnoměrně, pak na této množině konverguje k funkci f bodově. Opak obecně neplatí.

Je-li množina M uzavřeným intervalem $[a, b]$ a každá z funkcí f_n je spojitá, je stejnoměrná konvergence těchto funkcí konvergencí posloupnosti v metrickém prostoru $(C[a, b], \rho_C)$ (sr. 11.1.2.4). Podle 11.4.2.6 je tento prostor úplný, což znamená, že stejnoměrná limita spojitých funkcí je funkcí spojitou.

8.1.3 Příklady

Nechť $f_n(x) = \frac{2nx}{1+n^2x^2}$.

- Posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje na intervalu $[1, 2]$ stejnoměrně k funkci $f(x) \equiv 0$.

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Položme $n_0 = \left\lceil \frac{2}{\varepsilon} + 1 \right\rceil$. Pak $n_0 > \frac{2}{\varepsilon}$, $\frac{2}{n_0} < \varepsilon$.

Pro $n \geq n_0$ platí $|f_n(x) - f(x)| = |f_n(x)| = \frac{2nx}{1+n^2x^2} < \frac{2nx}{n^2x^2} = \frac{2}{nx} \leq \frac{2}{n} \leq \frac{2}{n_0} < \varepsilon$. \square

- Posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje na intervalu $[0, 1]$ bodově k funkci $f(x) \equiv 0$, ale tato konvergence není stejnoměrná.

D.: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2nx}{1+n^2x^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2x}{n}}{\frac{1}{n^2} + x^2} = 0$ pro libovolné $x \in \mathbb{R}$.

$f_n\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{2n \cdot \frac{1}{n}}{1+n^2 \cdot \frac{1}{n^2}} = \frac{2}{2} = 1$ pro každé $n \in \mathbb{N}$. Pro $\varepsilon \in (0, 1)$ je tedy $|f_n\left(\frac{1}{n}\right) - f(x)| = |f_n\left(\frac{1}{n}\right)| = 1 > \varepsilon$.

\square

8.1.4 Věta (Cauchyovo - Bolzanovo kritérium)

Posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0$, $m \geq n_0$ a každé $x \in M$ platí $|f_m(x) - f_n(x)| < \varepsilon$.

D.: „ \Rightarrow “ analogie 1.3.22

„ \Leftarrow “ Pro každé $x \in M$ je číselná posloupnost $\{f_n(x)\}$ Cauchyovská. Existuje tedy bodová $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f$.

Ukážeme, že $f_n \rightrightarrows f$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n, m \geq n_0$ a každé $x \in M$ platí $|f_m(x) - f_n(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Odtud $|f_n(x) - f(x)| = \lim_{m \rightarrow \infty} |f_n(x) - f_m(x)| \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$. \square

Poznámka: Posloupnost funkcí, která má vlastnost z 8.1.4, se nazývá *stejněměrně Cauchyovská*.

8.1.5 Věta

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ k funkci f a nechť g je funkce ohraničená na M . Pak $gf_n \rightrightarrows gf$ na M .

D.: Existuje $k \in \mathbb{R}$, že $|g(x)| < k$ pro každé $x \in M$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. K $\frac{\varepsilon}{k} > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ a $x \in M$ platí $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{k}$. Nyní pro

každé $x \in M$ a $n \geq n_0$ platí $|g(x)f_n(x) - g(x)f(x)| = |g(x)||f_n(x) - f(x)| < k \frac{\varepsilon}{k} = \varepsilon$. \square

8.1.6 Věta

Buďte $\{f_n\}, \{g_n\}$ posloupnosti funkcí a $M \subseteq \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n\right) \cap \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } g_n\right)$. Jestliže $f_n \rightrightarrows f, g_n \rightrightarrows g$ na M pak $f_n + g_n \rightrightarrows f + g$ na M .

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $x \in M$ a $n \geq n_1$ je $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $x \in M$ a $n \geq n_2$ je $|g_n(x) - g(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Tedy pro všechna $x \in M$ a $n \geq n_0 = \max\{n_1, n_2\}$ platí

$$|f_n(x) + g_n(x) - f(x) - g(x)| \leq |f_n(x) - f(x)| + |g_n(x) - g(x)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \quad \square$$

8.1.7 Důsledek

Nechť $f_n^1 \rightrightarrows f^1, f_n^2 \rightrightarrows f^2, \dots, f_n^k \rightrightarrows f^k, c_1, c_2, \dots, c_k \in \mathbb{R}$. Pak

$$c_1 f_n^1 + c_2 f_n^2 + \dots + c_k f_n^k = \sum_{i=1}^k c_i f_n^i \rightrightarrows \sum_{i=1}^k c_i f^i.$$

8.1.8 Definice

Buď $\{f_n\}$ posloupnost funkcí, $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$. Pro každé $n \in \mathbb{N}$ položme $s_n = f_1 + f_2 + \dots + f_n$. Posloupnost funkcí $\{s_n\}$ se nazývá *posloupnost částečných součtů řady funkcí* $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$.

Řekneme, že řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ *bodově konverguje na množině M a má zde součet s* , jestliže $\{s_n\}$ bodově konverguje k funkci s na M .

Množina $\left\{x \in \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n : \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \text{ konverguje}\right\}$, se nazývá *obor bodové konvergence řady funkcí* $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$.

Řekneme, že řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ *stejně konverguje na množině M a má zde součet s* , jestliže $\{s_n\}$ stejnoměrně konverguje k funkci s na M .

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n = s \text{ bodově na } M, \text{ jestliže pro každé } x \in M \text{ je } \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) = s(x).$$

Jestliže řada funkcí konverguje na nějaké množině stejnoměrně, pak na ní konverguje bodově. Opak obecně neplatí.

8.1.9 Věta

Nechť řady funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n^1 = s^1, \sum_{n=1}^{\infty} f_n^2 = s^2, \dots, \sum_{n=1}^{\infty} f_n^k = s^k$ konvergují ke svým součtům stejnoměrně na množině

$M \subseteq \bigcap_{j=1}^k \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n^j\right)$ a $c_1, c_2, \dots, c_k \in \mathbb{R}$. Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^k c_j f_n^j\right)$ konverguje stejnoměrně k $\sum_{j=1}^k c_j s^j$ na M .

D.: Plyne z 8.1.7. \square

8.1.10 Věta (Cauchyovo - Bolzanovo kritérium)

Řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ konverguje stejnoměrně na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0, m \in \mathbb{N}$ a $x \in M$ platí $|f_{n+1}(x) + f_{n+2}(x) + \dots + f_{n+m}(x)| < \varepsilon$.

D.: Aplikací 8.1.4 na posloupnost částečných součtů. \square

8.1.11 Definice

Řekneme, že řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ konverguje na množině $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ absolutně, jestliže pro každé $x \in M$ konverguje (číselná) řada $\sum_{n=1}^{\infty} |f_n(x)|$.

8.1.12 Věta (srovnávací kritérium)

Budte $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ a $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnosti funkcí, $M \subseteq \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n\right) \cap \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } g_n\right)$ a necht' $|f_n(x)| \leq g_n(x)$ pro všechna $n \in \mathbb{N}$ a $x \in M$. Jestliže řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} g_n$ konverguje stejnoměrně na M , pak řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ konverguje na M stejnoměrně a absolutně.

D.: Nejprve poznamenejme, že z podmínky $|f_n(x)| \leq g_n(x)$ plyne, že všechny funkce g_n jsou nezáporné. Absolutní bodová konvergence plyne z 7.2.4. Ukážeme, že konvergence je stejnoměrná.

Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 8.1.10 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0$, $m \in \mathbb{N}$, $x \in M$ platí

$$|g_{n+1}(x) + g_{n+2}(x) + \cdots + g_{n+m}(x)| = g_{n+1}(x) + g_{n+2}(x) + \cdots + g_{n+m}(x) < \varepsilon.$$

Tedy

$$\begin{aligned} |f_{n+1}(x) + f_{n+2}(x) + \cdots + f_{n+m}(x)| &\leq |f_{n+1}(x)| + |f_{n+2}(x)| + \cdots + |f_{n+m}(x)| \leq \\ &\leq g_{n+1}(x) + g_{n+2}(x) + \cdots + g_{n+m}(x) < \varepsilon. \end{aligned}$$

□

8.1.13 Důsledek (Weierstrassovo [1815 – 1897] kritérium)

Bud' $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnosti funkcí, $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$ a necht' pro všechna $n \in \mathbb{N}$ a $x \in M$ platí $|f_n(x)| \leq a_n \in \mathbb{R}$.

Jestliže (číselná) řada $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ konverguje, pak řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ konverguje absolutně a stejnoměrně na M .

8.1.14 Kritéria stejnoměrné konvergence

Bud' $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnosti funkcí, $M \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} \text{Dom } f_n$.

$\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ se nazývá *nerostoucí* (resp. *neklesající*) na M , jestliže pro každé $x \in M$ je číselná posloupnost $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ nerostoucí (resp. neklesající). Je-li $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ nerostoucí nebo neklesající, nazývá se *monotonní*.

$\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ se nazývá *stejně ohraničená* na M , jestliže existuje konstanta $k \in \mathbb{R}$ taková, že pro všechna $x \in M$ a všechna $n \in \mathbb{N}$ je $|f_n(x)| \leq k$.

1. Dirichletovo kritérium:

Necht' posloupnost funkcí $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ je monotonní na M , $g_n \rightrightarrows 0$ na M a posloupnost částečných součtů řady funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ je stejnoměrně ohraničená na M . Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} f_n g_n$ stejnoměrně konverguje na M .

2. Důsledek Dirichletova kritéria:

Necht' číselná posloupnost $\{a_n\}_{n=1}^{\infty}$ je monotonní taková, že $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ a posloupnost částečných součtů řady funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ je stejnoměrně ohraničená na M . Pak řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} a_n f_n$ stejnoměrně konverguje na M .

3. Abelovo kritérium:

Necht' posloupnost funkcí $\{g_n\}_{n=1}^{\infty}$ je stejnoměrně ohraničená na M a necht' řada funkcí $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ stejnoměrně konverguje na M . Pak řada $\sum_{n=1}^{\infty} f_n g_n$ stejnoměrně konverguje na M .

8.2 Vlastnosti stejnoměrně konvergentních posloupností a řad

8.2.1 Věta

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Je-li každá z funkcí f_n spojitá v bodě $x_0 \in J$, pak je f spojitá v bodě x_0 .

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

Poněvadž $f_n \rightrightarrows f$ na J , existuje $n_1 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_1$, $x \in J$ platí $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Poněvadž f_n je spojitá v x_0 , existuje $\delta > 0$, že pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap J$ platí $|f_n(x) - f_n(x_0)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Poněvadž $f_n(x_0) \rightarrow f(x_0)$, existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$ platí $|f_n(x_0) - f(x_0)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Pro $n \geq \max\{n_1, n_2\}$ a každé $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \cap J$ platí

$$\begin{aligned} |f(x) - f(x_0)| &= |f(x) - f_n(x) + f_n(x) - f_n(x_0) + f_n(x_0) - f(x_0)| \leq \\ &\leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - f_n(x_0)| + |f_n(x_0) - f(x_0)| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon. \end{aligned}$$

□

8.2.2 Důsledek

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Je-li každá z funkcí f_n spojitá na J , pak je f spojitá na J .

8.2.3 Věta (Moore [1882–1974] - Osgood [1864–1943])

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť $x_0 \in J$ nebo x_0 je krajní bod intervalu J a nechť pro všechna $n \in \mathbb{N}$ existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = a_n \in \mathbb{R}$. (V případě, že x_0 je krajní bod intervalu J , jedná se o příslušnou jednostrannou limitu.) Pak existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in \mathbb{R}$ a $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \in \mathbb{R}$ a platí $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$, neboli

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) \right) = \lim_{x \rightarrow x_0} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \right).$$

D.: Buď $\varepsilon > 0$ libovolné.

Podle 8.1.4 existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $m, n \geq n_0$, $x \in J$ platí $|f_m(x) - f_n(x)| < \frac{\varepsilon}{2}$.

Limitním přechodem pro $x \rightarrow x_0$ dostaneme $|a_m - a_n| \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$. Posloupnost $\{a_n\}$ je tedy Cauchyovská a podle 1.3.22 existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R}$.

Ukážeme, že $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$:

$f_n \rightrightarrows f$ na J \Rightarrow existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_2$, $x \in J$ je $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

$\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = a_n$ \Rightarrow existuje $\delta > 0$, že pro $x \in ((x_0 - \delta, x_0 + \delta) \setminus \{x_0\}) \cap J$ je $|f_n(x) - a_n| < \frac{\varepsilon}{3}$.

$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ \Rightarrow existuje $n_3 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_3$ je $|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Pro $n \geq \max\{n_2, n_3\}$ platí $|f(x) - a| = |f(x) - f_n(x) + f_n(x) - a_n + a_n - a| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon$. □

8.2.4 Věta

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na intervalu $[a, b] \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť všechny funkce f_n jsou na $[a, b]$ integrabilní v Riemannově smyslu a $x_0 \in [a, b]$ je libovolný. Pak funkce f je integrabilní na $[a, b]$ a pro každé $x \in [a, b]$ platí $\int_{x_0}^x f(t) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{x_0}^x f_n(t) dt$, neboli

$$\int_{x_0}^x \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(t) \right) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int_{x_0}^x f_n(t) dt \right),$$

příčemž konvergence posloupnosti funkcí na pravé straně je stejnoměrná na intervalu $[a, b]$.

D.: Nejdříve ukážeme, že $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$ je integrabilní. Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné.

Poněvadž $f_n \rightrightarrows f$, existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $x \in [a, b]$ platí $|f_{n_0}(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{4(b-a)}$.

Poněvadž funkce f_{n_0} je integrabilní, podle 5.1.10 existuje dělení $D = \{x_0, x_1, \dots, x_k\} \in \mathcal{D}([a, b])$ takové, že $S(D, f_{n_0}) - s(D, f_{n_0}) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Označme $\tilde{m}_i = \inf\{f_{n_0}(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $\tilde{M}_i = \sup\{f_{n_0}(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$,
 $m_i = \inf\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$, $M_i = \sup\{f(x) : x \in [x_{i-1}, x_i]\}$.

Pak $|\tilde{m}_i - m_i| < \frac{\varepsilon}{4(b-a)}$, $|\tilde{M}_i - M_i| < \frac{\varepsilon}{4(b-a)}$, takže $M_i - m_i < \tilde{M}_i - \tilde{m}_i + \frac{\varepsilon}{2(b-a)}$. Dále

$$\begin{aligned} S(D, f) - s(D, f) &= \sum_{i=1}^k M_i(x_i - x_{i-1}) - \sum_{i=1}^k m_i(x_i - x_{i-1}) = \sum_{i=1}^k (M_i - m_i)(x_i - x_{i-1}) \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^k \left(\tilde{M}_i - \tilde{m}_i + \frac{\varepsilon}{2(b-a)} \right) (x_i - x_{i-1}) = \\ &= \sum_{i=1}^k (\tilde{M}_i - \tilde{m}_i)(x_i - x_{i-1}) + \frac{\varepsilon}{2(b-a)} \sum_{i=1}^k (x_i - x_{i-1}) = \\ &= S(D, f_{n_0}) - s(D, f_{n_0}) + \frac{\varepsilon}{2} < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon, \end{aligned}$$

což podle 5.1.10 znamená, že funkce f je integrabilní.

Označme $R[a, b]$ množinu všech Riemannovsky integrabilních (a tedy ohraničených) funkcí definovaných na intervalu $[a, b]$. Pro $\varphi, \psi \in R[a, b]$ položíme

$$\rho_S(\varphi, \psi) = \sup\{|\varphi(x) - \psi(x)| : x \in [a, b]\}.$$

Analogicky jako v 11.1.2.4 ověříme, že $(R[a, b], \rho_S)$ je metrický prostor a snadno nahlédneme, že stejnoměrná konvergence posloupnosti funkcí integrabilních na intervalu $[a, b]$ je konvergencí posloupnosti v prostoru $(R[a, b], \rho_S)$. (Podle první části důkazu je prostor $(R[a, b], \rho_S)$ úplný.)

Definujeme zobrazení $F : R[a, b] \rightarrow C[a, b]$ předpisem

$$F(\varphi)(x) = \int_{x_0}^x \varphi(t) dt.$$

Pro $\varphi, \psi \in R[a, b]$ platí:

$$\begin{aligned} \rho_C(F(\varphi), F(\psi)) &= \max\{|F(\varphi)(x) - F(\psi)(x)| : x \in [a, b]\} = \\ &= \max\left\{\left|\int_{x_0}^x \varphi(t) dt - \int_{x_0}^x \psi(t) dt\right| : x \in [a, b]\right\} = \\ &= \max\left\{\left|\int_{x_0}^x (\varphi(t) - \psi(t)) dt\right| : x \in [a, b]\right\} \leq \\ &\leq \max\left\{\left|\int_{x_0}^x |\varphi(t) - \psi(t)| dt\right| : x \in [a, b]\right\} \leq \\ &\leq \max\left\{\left|\int_{x_0}^x \sup\{|\varphi(\tau) - \psi(\tau)| : \tau \in [a, b]\} dt\right| : x \in [a, b]\right\} = \\ &= \max\{|(x - x_0)| \rho_S(\varphi, \psi) : x \in [a, b]\} = \max\{(b - x_0), (x_0 - a)\} \rho_S(\varphi, \psi). \end{aligned}$$

Označíme-li tedy $L = \max\{(b - x_0), (x_0 - a)\}$, je $\rho_C(F(\varphi), F(\psi)) \leq L\rho_S(\varphi, \psi)$, což znamená, že F je Lipschitzovské zobrazení a podle 11.5.10 spojitě.

Podle 11.5.3 převádí spojitě zobrazení metrických prostorů konvergentní posloupnost na konvergentní posloupnost a platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F(f_n) = F\left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n\right),$$

což je formule z tvrzení věty. Navíc konvergence posloupnosti v prostoru $C[a, b]$ je stejnoměrnou konvergencí posloupnosti funkcí. \square

8.2.5 Věta

Nechť posloupnost funkcí $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na intervalu $[a, b] \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť všechny funkce f_n jsou na $[a, b]$ integrabilní v Riemannově smyslu. Pak funkce f je integrabilní na $[a, b]$ a platí

$$\int_a^b f(t)dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(t)dt, \text{ neboli}$$

$$\int_a^b \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(t)\right) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int_a^b f_n(t)dt\right).$$

D.: plyne bezprostředně z 8.2.4 a z toho, že z konvergence stejnoměrné plyne bodová. \square

8.2.6 Věta

Buď $\{f_n\}$ posloupnost funkcí diferencovatelných na otevřeném intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$. Nechť existuje $x_0 \in J$ takový bod, že (číselná) posloupnost $\{f_n(x_0)\}$ konverguje. Jestliže posloupnost funkcí $\{f'_n\}$ konverguje stejnoměrně na J , pak posloupnost $\{f_n\}$ konverguje stejnoměrně na J k diferencovatelné funkci f , pro niž platí $f'(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f'_n(x)$ pro každé $x \in J$, neboli

$$\left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)\right)' = \lim_{n \rightarrow \infty} f'_n(x), \quad \text{tj.} \quad \frac{d}{dx} \left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{d}{dx} f_n(x)\right).$$

D.: Především poznamenejme, že vzhledem k 5.2.16 zůstává věta 8.2.4 v platnosti, zaměníme-li $[a, b]$ za (a, b) . Podle 5.3.3 a 4.1.5 existuje posloupnost $\{c_n\}$ taková, že

$$f_n(x) = c_n + \int_{x_0}^x f'_n(t)dt.$$

Odtud plyne, že $f_n(x_0) = c_n$ a tedy podle předpokladu existuje $c = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n$. Podle předpokladu dále existuje funkce g taková, že $f'_n \rightrightarrows g$ na J . Pro $x \in J$ položíme

$$f(x) = c + \int_{x_0}^x g(t)dt.$$

Funkce f je podle 5.3.3 diferencovatelná. Podle 8.2.4 $\int_{x_0}^x f'_n(t)dt \rightrightarrows \int_{x_0}^x g(t)dt$, takže

$$f_n = c_n + \int_{x_0}^x f'_n(t)dt \rightrightarrows c + \int_{x_0}^x g(t)dt = f \text{ a podle 5.3.3 pro každé } x \in J \text{ je } f'(x) = g(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f'_n(x). \square$$

Poznámky:

1. Předpoklad o existenci $x_0 \in J$ takového, že existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) \in \mathbb{R}$ nelze obecně vynechat.

Např.: $f_n(x) \equiv n, f'_n \equiv 0 \rightrightarrows 0$, avšak $\{f_n\}$ nekonverguje.

2. Z předpokladu stejnoměrné konvergence posloupnosti diferencovatelných funkcí $\{f_n\}$ neplyne (ani bodová) konvergence posloupnosti funkcí $\{f'_n\}$.

Např.: $f_n(x) = \frac{1}{n} \sin nx$, $J = (-2\pi, 2\pi)$. Pak $f_n \rightrightarrows 0$, $f'_n(x) = \cos nx$, $f'_n(\pi) = \cos n\pi = (-1)^n$.

Následující věty plynou z předchozích užitím posloupnosti částečných součtů řady funkcí.

8.2.7 Věta

Nechť řada funkcí $\sum f_n$ konverguje stejnoměrně na intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Je-li každá z funkcí f_n spojitá na J , pak je f spojitá na J .

8.2.8 Věta

Nechť řada funkcí $\sum f_n$ konverguje stejnoměrně na intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť $x_0 \in J$ nebo x_0 je krajní bod intervalu J a nechť pro všechna $n \in \mathbb{N}$ existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = a_n \in \mathbb{R}$. (V případě, že x_0 je krajní bod intervalu J , jedná se o příslušnou jednostrannou limitu.) Pak řada $\sum a_n$ konverguje, existuje $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \in \mathbb{R}$ a platí $\sum a_n = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$, neboli

$$\sum \left(\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) \right) = \lim_{x \rightarrow x_0} \left(\sum f_n(x) \right).$$

8.2.9 Věta

Nechť řada funkcí $\sum f_n$ konverguje stejnoměrně na intervalu $[a, b] \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť všechny funkce f_n jsou na $[a, b]$ integrabilní v Riemannově smyslu a $x_0 \in [a, b]$ je libovolný. Pak funkce f je integrabilní na $[a, b]$ a pro každé $x \in [a, b]$ platí $\int_{x_0}^x f(t) dt = \sum \int_{x_0}^x f_n(t) dt$, neboli

$$\int_{x_0}^x \left(\sum f_n(t) \right) dt = \sum \left(\int_{x_0}^x f_n(t) dt \right),$$

přičemž konvergence řady funkcí na pravé straně je stejnoměrná na intervalu $[a, b]$.

8.2.10 Věta

Nechť řada funkcí $\sum f_n$ konverguje stejnoměrně na intervalu $[a, b] \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$ k funkci f . Nechť všechny funkce f_n jsou na $[a, b]$ integrabilní v Riemannově smyslu. Pak funkce f je integrabilní na $[a, b]$ a platí $\int_a^b f(t) dt = \sum \int_a^b f_n(t) dt$, neboli

$$\int_a^b \left(\sum f_n(t) \right) dt = \sum \left(\int_a^b f_n(t) dt \right).$$

8.2.11 Věta

Buď $\sum f_n$ řada funkcí diferencovatelných na otevřeném intervalu $J \subseteq \bigcap \text{Dom } f_n$. Nechť existuje $x_0 \in J$ takový bod, že (číselná) řada $\sum f_n(x_0)$ konverguje. Jestliže řada funkcí $\sum f'_n$ konverguje stejnoměrně na J , pak řada $\sum f_n$ konverguje stejnoměrně na J k diferencovatelné funkci f , pro niž platí $f'(x) = \sum f'_n(x)$ pro každé $x \in J$, neboli

$$\left(\sum f_n(x) \right)' = \sum f'_n(x), \quad \text{tj.} \quad \frac{d}{dx} \left(\sum f_n(x) \right) = \sum \left(\frac{d}{dx} f_n(x) \right).$$

8.3 Mocninné řady

8.3.1 Definice

Buď $\{a_n\}_{n=0}^{\infty}$ posloupnost reálných čísel, $x_0 \in \mathbb{R}$. *Mocninná (potenční) řada se středem x_0 a koeficienty a_n je řada funkcí $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$.*

Specielně pro $x_0 = 0$ jde o řadu $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$.

Substituce $y = x - x_0$ převede řadu $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ v řadu $\sum_{n=0}^{\infty} a_n y^n$. Proto se v první části tohoto odstavce (po 8.3.11) omezíme na mocninné řady tvaru $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$.

Mocninná řada konverguje ve svém středu a má zde součet a_0 .

8.3.2 Definice

Buď $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ mocninná řada. Jestliže tato řada konverguje pro každé $x \in \mathbb{R}$, řekneme, že řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ *vždy konverguje*. Jestliže tato řada pro každé $x \neq 0$ diverguje, řekneme, že řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ *vždy diverguje*.

Příklady:

1. Řada $\sum_{n=1}^{\infty} n^n x^n$ vždy diverguje.

Buď $x_1 \in \mathbb{R}$ libovolné. Pro $n \geq \frac{2}{|x_1|}$ je $|n^n x_1^n| \geq 2^n \rightarrow \infty$, a tedy nemůže být $\lim_{n \rightarrow \infty} n^n x_1^n = 0$. Podle 7.1.5 (číselná) řada $\sum_{n=1}^{\infty} n^n x_1^n$ diverguje.

2. Řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ vždy konverguje.

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left| \frac{x^{n+1}}{(n+1)!} \right|}{\left| \frac{x^n}{n!} \right|} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x|}{n+1} = 0$, takže podle 7.2.11 číselná řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ řada absolutně konverguje.

8.3.3 Věta

Buď $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ mocninná řada.

Jestliže existuje $x_0 \in \mathbb{R}$ takové, že (číselná) řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$ konverguje, pak pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x| < |x_0|$ řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ konverguje absolutně.

Jestliže existuje $x_0 \in \mathbb{R}$ takové, že (číselná) řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$ diverguje, pak pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x| > |x_0|$ řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ diverguje.

Jestliže mocninná řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ ani vždy nekonverguje, ani vždy nediverguje, pak existuje $r \in \mathbb{R}$ takové, že tato řada konverguje absolutně pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x| < r$ a diverguje pro každé $x \in \mathbb{R}$, $|x| > r$.

D.: • Necht' $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$ konverguje. Buď $x \in \mathbb{R}$, $|x| < x_0$.

Poněvadž $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$ konverguje, podle 7.1.5 je $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n x_0^n| = 0$ a tedy podle 1.3.4 existuje $k \in \mathbb{R}$, že

$|a_n x_0^n| \leq k$ pro každé $n \in \mathbb{N}$.

Pro $x \in \mathbb{R}$, $|x| < |x_0|$ platí $|a_n x^n| = \left| a_n x_0^n \frac{x^n}{x_0^n} \right| = |a_n x_0^n| \left| \frac{x}{x_0} \right|^n < k \left| \frac{x}{x_0} \right|^n$.

Podle 7.1.3 řada $\sum_{n=0}^{\infty} k \left| \frac{x}{x_0} \right|^n$ konverguje a tedy podle 7.2.4 konverguje i řada $\sum_{n=0}^{\infty} |a_n x^n|$, neboli $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ konverguje absolutně.

- Necht' $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$ diverguje. Kdyby existovalo $x_1 \in \mathbb{R}$, $|x_1| > |x_0|$ takové, že by $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_1^n$ konvergovala, pak by podle již dokázané části konvergovala i řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x_0^n$.

- Označme $M = \left\{ x \in \mathbb{R} : x \geq 0, \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \text{ konverguje} \right\}$. Poněvadž $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ vždy nediverguje, existuje podle předchozího tvrzení horní závora množiny M . Podle 1.1.7 existuje $r = \sup M \in \mathbb{R}$.
Je-li $x \in \mathbb{R}$, $|x| > r$, pak $x \notin M$, $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ diverguje.
Je-li $x \in \mathbb{R}$, $|x| < r$, pak podle 1.1.6(s2*) existuje $x_0 \in M$ takové, že $x_0 > |x|$. Podle prvního tvrzení řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ konverguje absolutně. \square

8.3.4 Definice

Číslo r z 8.3.3 se nazývá *poloměr konvergence* mocninné řady $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, a otevřený interval $(-r, r)$ se nazývá *konvergenční interval* této řady.

Jestliže řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ vždy konverguje, klademe $r = \infty$, jestliže tato řada vždy diverguje, klademe $r = 0$.

Příklad: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$

Pro $x = 1$ se jedná o řadu harmonickou, tedy podle 1.1.2.1 divergentní.

Pro $x = -1$ se jedná o řadu Leibnizovu, tedy podle 7.3.8 konvergentní.

V tomto případě je tedy $r = 1$, konvergenční interval je $(-1, 1)$, obor konvergence je $[-1, 1)$.

8.3.5 Věta (Cauchy [1789 – 1857] - Hadamard [1865 – 1963])

Buď $\sum a_n x^n$ mocninná řada a r její poloměr konvergence. Pak

$$\frac{1}{r} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}.$$

Přitom klademe $r = 0$ pro $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \infty$ a $r = \infty$ pro $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 0$.

D.:

- Necht' $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 0$. Ukážeme, že $\sum a_n x^n$ vždy konverguje.

Buď $x_0 \in \mathbb{R}$, $x_0 \neq 0$ libovolné. Pak $\frac{1}{2|x_0|} > 0 = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$. Tedy existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$

platí $\frac{1}{2|x_0|} > \sqrt[n]{|a_n|}$, tedy $\left(\frac{1}{2}\right)^n \frac{1}{|x_0|^n} > |a_n|$. Odtud $|a_n| |x_0|^n < \left(\frac{1}{2}\right)^n$. Řada $\sum \left(\frac{1}{2}\right)^n$ podle 7.1.3 konverguje a tedy podle 7.2.4 řada $\sum a_n x_0^n$ konverguje absolutně.

- Necht' $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \infty$. Ukážeme, že $\sum a_n x^n$ vždy diverguje.

Buď $x_0 \in \mathbb{R}$, $x_0 \neq 0$ libovolné. Pak pro nekonečně mnoho indexů n platí $\sqrt[n]{|a_n|} > \frac{1}{|x_0|}$ a tedy pro nekonečně mnoho indexů n platí $|a_n| |x_0|^n > 1$. To znamená, že nemůže být $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n x_0^n = 0$ a tedy podle 7.1.5 řada $\sum a_n x_0^n$ diverguje.

• Necht $0 < a = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$.

– Buď $x_0 \in \mathbb{R}$, $0 < |x_0| < \frac{1}{a}$. Ukážeme, že $\sum a_n x_0^n$ konverguje.

Zvolme $b \in \mathbb{R}$, $|x_0| < b < \frac{1}{a}$. Pak $\frac{1}{b} > a$ a tedy existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro $n \geq n_0$ je $\sqrt[n]{|a_n|} < \frac{1}{b}$.

Odtud $\sqrt[n]{|a_n|} |x_0| < \frac{|x_0|}{b}$, $|a_n x_0^n| < \frac{1}{b^n} |x_0|^n = \left(\frac{|x_0|}{b}\right)^n$. Poněvadž $\frac{|x_0|}{b} < 1$, řada $\sum \left(\frac{|x_0|}{b}\right)^n$ podle 7.1.3 konverguje, a tedy podle 7.2.4 řada $\sum a_n x_0^n$ konverguje absolutně.

– Buď $x_0 \in \mathbb{R}$, $|x_0| > \frac{1}{a}$. Ukážeme, že $\sum a_n x_0^n$ diverguje.

Pro nekonečně mnoho indexů n platí $\sqrt[n]{|a_n|} > \frac{1}{|x_0|}$, $|a_n x_0^n| > 1$ a nemůže být $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n x_0^n| = 0$.

Podle 7.1.5 řada $\sum a_n x_0^n$ diverguje.

□

8.3.6 Důsledek

Buď $\{a_n\}$ posloupnost kladných čísel. Jestliže existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = a \in \mathbb{R}^*$, pak mocninná řada $\sum a_n x^n$ má poloměr konvergence $r = \frac{1}{a}$ (přitom klademe $r = 0$ pro $a = \infty$ a $r = \infty$ pro $a = 0$).

D.: Plyne z 7.2.12. □

8.3.7 Věta

Necht mocninná řada $\sum a_n x^n$ má poloměr konvergence $r > 0$. Pak tato řada konverguje stejnoměrně na libovolném uzavřeném intervalu $[a, b] \subseteq (-r, r)$.

Konverguje-li řada $\sum a_n r^n$, pak mocninná řada $\sum a_n x^n$ konverguje stejnoměrně na uzavřeném intervalu $[a, r]$ pro libovolné $a \in (-r, r)$.

Konverguje-li řada $\sum a_n (-r)^n$, pak mocninná řada $\sum a_n x^n$ konverguje stejnoměrně na uzavřeném intervalu $[-r, a]$ pro libovolné $a \in (-r, r)$.

D.: Položme $c = r - \frac{1}{2}(r - \max\{|a|, |b|\})$. Pak pro každé $x_0 \in [a, b]$ je $|x_0| < c$, tedy $|a_n x_0^n| < |a_n c^n|$. Podle 8.3.3 řada $\sum |a_n c^n|$ konverguje a tedy podle 8.1.13 řada $\sum a_n x^n$ konverguje absolutně a stejnoměrně na $[a, b]$.

Necht řada $\sum a_n r^n$ konverguje. Bez újmy na obecnosti můžeme předpokládat $r = 1$. (V opačném případě lze použít substituci $x \mapsto \frac{x}{r}$.)

(Číselná) řada $\sum a_n = \sum a_n 1^n$ konverguje.

Ukážeme, že řada funkcí $\sum a_n x^n$ konverguje stejnoměrně na $[0, 1]$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 7.1.4 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_0$ a libovolné $m \in \mathbb{N}$ je

$$|a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m}| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Buď $x \in [0, 1)$. Pak

$$\begin{aligned} & |a_{n+1}x^{n+1} + a_{n+2}x^{n+2} + \dots + a_{n+m}x^{n+m}| = \\ & = |a_{n+1}(x^{n+1} - x^{n+2} + x^{n+2} - x^{n+3} + x^{n+3} - \dots - x^{n+m} + x^{n+m}) + \\ & \quad + a_{n+2}(x^{n+2} - x^{n+3} + x^{n+3} - \dots - x^{n+m} + x^{n+m}) + \dots + \\ & \quad + a_{n+m-1}(x^{n+m-1} - x^{n+m} + x^{n+m}) + a_{n+m}x^{n+m}| = \\ & = |a_{n+1}(x^{n+1} - x^{n+2}) + (a_{n+1} + a_{n+2})(x^{n+2} - x^{n+3}) + \\ & \quad + (a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3})(x^{n+3} - x^{n+4}) + \dots + (a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m-1})(x^{n+m-1} - x^{n+m}) + \\ & \quad + (a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m})x^{n+m}| = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= |(1-x)[a_{n+1}x^{n+1} + (a_{n+1} + a_{n+2})x^{n+2} + (a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3})x^{n+3} + \dots + \\
&\quad + (a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m-1})x^{n+m-1}] + (a_{n+1} + a_{n+2} + \dots + a_{n+m})x^{n+m}| \leq \\
&\leq (1-x)\varepsilon(x^{n+1} + x^{n+2} + x^{n+3} + \dots + x^{n+m-1}) + \varepsilon x^{n+m} = \\
&= (1-x)\frac{\varepsilon}{2}x^{n+1}\frac{1-x^{n+m-1}}{1-x} + \frac{\varepsilon}{2}x^{n+m} = \frac{\varepsilon}{2}(x^{n+1} - x^{2n+m} + x^{n+m}) \leq \varepsilon x^{n+1} < \varepsilon.
\end{aligned}$$

Tedy pro každé $x \in [0, 1]$ je $|a_{n+1}x^{n+1} + a_{n+2}x^{n+2} + \dots + a_{n+m}x^{n+m}| < \varepsilon$, což podle 8.1.10 znamená, že řada funkcí $\sum a_n x^n$ konverguje stejnoměrně na $[0, 1]$.

Třetí tvrzení lze dokázat analogicky. \square

8.3.8 Věta (Abel [1802 – 1829])

Nechť mocninná řada $\sum a_n x^n$ má poloměr konvergence r . Pak součet s této řady je funkce spojitá na intervalu $(-r, r)$.

Nechť $0 < r < \infty$ a řada $\sum a_n r^n$ (resp. řada $\sum a_n (-r)^n$) je konvergentní. Pak součet s řady $\sum a_n x^n$ je funkce zleva spojitá v bodě r (resp. zprava spojitá v bodě $-r$).

D.: Věta plyne z 8.3.7, 8.2.7 a 8.2.8. \square

8.3.9 Poznámky

1. Nechť mocninná řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ má poloměr konvergence r . Pak řada

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} x^{n+1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{n-1}}{n} x^n = \int_0^x \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n \right) dt$$

má také poloměr konvergence r . (sr. 8.2.9)

$$\text{D.: } \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{|a_n|}{n+1}} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{1}{n+1}} \cdot \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 1 \cdot r = r \quad \square$$

2. Nechť mocninná řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ má poloměr konvergence r . Pak řada

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^{n-1} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \right)'$$

má také poloměr konvergence r . (sr. 8.2.11)

3. Nechť mocninná řada $\sum a_n x^n$ má poloměr konvergence r . Pak součet $s(x)$ této řady má na $(-r, r)$ derivace všech řádů, přičemž k -tou derivací obdržíme k -násobným derivováním této řady „člen po členu“ a vzniklá mocninná řada má opět poloměr konvergence r .

8.3.10 Příklad

$$\begin{aligned}
\operatorname{arctg}(x) &= \int_0^x \frac{d}{dt} \operatorname{arctg} t dt = \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \int_0^x \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n t^{2n} dt = \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x t^{2n} dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{t^{2n+1}}{2n+1} \right]_0^x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \\
\frac{\pi}{4} &= \operatorname{arctg} 1 = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{2n+1} \quad \Rightarrow \quad \pi = 4 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{2n+1}
\end{aligned}$$

$$4 \sum_{n=0}^{499999} (-1)^n \frac{1}{2n+1} = 3.141590653589793240462643383269502884197$$

(Podtržením jsou vyznačeny nesprávné cifry; jsou čtyři na prvních čtyřiceti desetinných místech.)

8.3.11 Definice

Bud' f funkce, která má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ derivace všech řádů. *Taylorovou řadou funkce f v bodě x_0* rozumíme mocninnou řadu

$$f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{2!}(x-x_0)^3 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n.$$

Speciálně pro $x_0 = 0$ mluvíme o *Maclaurinově řadě*.

8.3.12 Věta

Nechť funkce f má v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$ derivace všech řádů. Její Taylorova řada konverguje na nějakém intervalu J obsahujícím bod x_0 k funkci f právě tehdy, když pro posloupnost jejích Taylorových zbytků platí $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n = 0$.

D.: Využijeme větu 2.6.8 a označení v ní používané. Pro posloupnost $\{s_n\}$ částečných součtů Taylorovy řady platí $s_n(x) = T_n(x) = f(x) - R_n$. \square

8.3.13 Věta

Nechť mocninná řada $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ má poloměr konvergence r . Pak je tato řada Taylorovou řadou svého součtu f v konvergenčním intervalu ($f^{(n)}(x_0) = a_n n!$).

D.: Analogicky jako 2.6.5. \square

8.3.14 Definice

Funkce f se nazývá *analytická v bodě $x_0 \in \mathbb{R}$* , jestliže existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ bodu x_0 takové, že na něm lze f vyjádřit jako součet mocninné řady. T.j. pro $x \in \mathcal{O}(x_0)$ platí $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$.

Funkce f se nazývá *analytická na otevřeném intervalu J* , je-li analytická v každém $x \in J$.

Je-li funkce f analytická, její vyjádření mocninou řadou (rozvoj do mocninné řady) je Taylorovou řadou. Zejména analytická funkce f má derivace všech řádů.

Opačné tvrzení neplatí. Funkce, která má derivace všech řádů nemusí být analytická.

Příklad: Funkce $f(x) = \begin{cases} e^{-1/|x|}, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$ má v bodě 0 derivace všech řádů rovny 0, tedy její Maclaurinova

řada $0 + 0x + 0x^2 + 0x^3 + \dots$ má na intervalu $(-\infty, \infty)$ součet 0, a přitom $f(x) > 0$ pro $x \neq 0$, což znamená, že funkce f není v bodě 0 analytická.

D.: Je-li $x > 0$, pak $f(x) = e^{-1/x}$, $f'(x) = \frac{1}{x^2}e^{-1/x}$,

$$f''(x) = -\frac{2}{x^3}e^{-1/x} + \frac{1}{x^4}e^{-1/x} = P_2\left(\frac{1}{x}\right)e^{-1/x}, \text{ kde } P_2 \text{ je polynom,}$$

$$f'''(x) = P_2'\left(\frac{1}{x}\right)\left(-\frac{1}{x^2}\right)e^{-1/x} + \frac{1}{x^2}P_2\left(\frac{1}{x}\right)e^{-1/x} = P_3\left(\frac{1}{x}\right)e^{-1/x}, \text{ kde } P_3 \text{ je polynom, atd.}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f^{(n)}(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} P_n\left(\frac{1}{x}\right)e^{-1/x} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_n(t)e^{-1/x} = 0.$$

Je-li $x < 0$, pak $f(x) = e^{1/x}$, $f'(x) = -\frac{1}{x^2}e^{1/x} = Q_1\left(\frac{1}{x}\right)e^{1/x}$, kde Q_1 je polynom,

$$f''(x) = \frac{2}{x^3}e^{1/x} + \frac{1}{x^4}e^{1/x} = Q_2\left(\frac{1}{x}\right)e^{1/x}, \text{ kde } Q_2 \text{ je polynom, atd.}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f^{(n)}(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} Q_n \left(\frac{1}{x} \right) e^{1/x} = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_n(-t) e^{-t} = 0.$$

Celkem tedy je $f^{(n)}(0) = \lim_{x \rightarrow 0} f^{(n)}(x) = 0$. \square

8.3.15 Maclaurinovy řady některých elementárních funkcí

1. $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}, \quad r = \infty$
2. $\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad r = \infty$
3. $\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!}, \quad r = \infty$
4. $\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n}, \quad r = 1, \quad x \in (-1, 1]$
5. $(1+x)^\alpha = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{\alpha}{n} x^n, \quad r = 1, \quad x \in (-1, 1)$
6. $\operatorname{arctg} x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}, \quad r = 1, \quad x \in [-1, 1]$

Sr. 2.6.7 a 8.3.10.

8.3.16 Aplikace mocninných řad

1. Výpočet funkčních hodnot
2. Výpočet limit
3. Výpočet derivací
4. Výpočet určitých i neurčitých integrálů
5. Sumace číselných řad
6. Výpočet obecného členu posloupnosti zadané rekurentně
7. Řešení počátečních úloh pro obyčejné diferenciální rovnice

8.4 Cvičení

Rozhodněte o konvergenci a absolutní konvergenci řad

- 1) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt[n]{n}}$
- 2) $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n+(-1)^n}}$
- 3) $\sum_{n=1}^{\infty} \ln \frac{n^2+1}{n^2} \cos \frac{\pi n^2}{n^2+1}$

4) Ukažte, že druhá mocnina (chápaná jako Cauchyův součin) konvergentní řady $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\sqrt{n}}$ je řada divergentní.

Najděte obory konvergence a absolutní konvergence řad funkcí

- 5) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{x^n}$
- 6) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{1-x^n}$
- 7) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{x+n}$
- 8) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}$
- 9) $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{1+x^{2n}}$
- 10) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x(x+n)}{n} \right)^n$
- 11) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cdot 2^{2n}}{3^n} x^n (1-x)$
- 12) $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{n+1} \left(\frac{x}{2x+1} \right)^n$
- 13) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\ln(1+x^n)}{n^2}$

Rozhodněte, zda uvedené řady konvergují na daném intervalu stejnoměrně

- 14) $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{x+2^n}, (-2, 2)$
- 15) $\sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) x^n, \left[-\frac{1}{2}, \frac{2}{3} \right]$
- 16) $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x-1}{x^n}, [1, 2]$

Najděte poloměry konvergence mocninných řad

$$17) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{a^n} \quad (a > 1) \quad 18) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{a^n + b^n} \quad (a > 0, b > 0) \quad 19) \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{n}{2n+1}\right)^n x^{2n}$$

Najděte obory konvergence mocninných řad

$$20) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nx^n}{2^n} \quad 21) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1} \quad 21) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^n}{n+1} x^n$$

Funkce rozviňte v Maclaurinovu řadu

$$22) \frac{x}{1+x-2x^2} \quad 23) \frac{1}{1-x-x^2} \quad 24) \frac{1-\frac{1}{2}x}{1-x+x^2}$$

$$25) \frac{x}{(1-x)(1-x^2)} \quad 26) \frac{1}{(1-x^2)\sqrt{1-x^2}} \quad 27) x \operatorname{arctg} x - \ln\sqrt{1+x^2}$$

Najděte součet mocninné řady

$$28) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n^2+1}{2^n n!} x^n \quad 29) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} \quad 30) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n(2n-1)} x^{2n}$$

$$31) \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^{n-1} \quad 32) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{n!} x^{2n} \quad 33) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{n+1} x^n$$

Najděte součet číselné řady

$$34) 1 - \frac{1}{4} + \frac{1}{7} - \frac{1}{10} + \frac{1}{13} - \dots \quad 35) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n+1}{2^n n!}$$

$$36) 1 - \frac{1}{2} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8} - \dots \quad 37) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{(2n+1)!}$$

S přesností alespoň 0.001 vypočítejte integrály

$$39) \int_0^{0.2} \sin x^2 dx \quad 40) \int_0^{0.4} \frac{1-e^{-x}}{x} dx \quad 41) \int_0^{0.1} \frac{dx}{\sqrt{1+x^4}}$$

Vypočítejte limity

$$42) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x - e^{-\frac{x^2}{2}}}{x^4} \quad 43) \lim_{x \rightarrow \infty} \left((x^3 - x^2 + \frac{x}{2}) e^{\frac{1}{x}} - \sqrt{x^6 + 1} \right) \quad 44) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - (\cos x)^{\sin x}}{x^3}$$

Výsledky: 1)diverguje 2)konverguje relativně 3)konverguje absolutně

5)absolutně pro $x \in (-\infty, -1) \cup (1, \infty)$ 6)absolutně pro $x \in (-1, 1)$ 7)relativně pro $x \in \mathbb{R} \setminus \{-1, -2, -3, \dots\}$

8)absolutně pro $x \in (1, \infty)$ 9)absolutně pro $x \in \mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$ 10)absolutně pro $x \in (-1, 1)$, relativně pro $x < 1$

11)absolutně pro $x \in \left(\frac{1-\sqrt{2}}{2}, \frac{1}{2}\right) \cup \left(\frac{1}{2}, \frac{1+\sqrt{2}}{2}\right)$ 12)absolutně pro $x \in (-\infty, -1) \cup \left(-\frac{1}{3}, \infty\right)$

13)absolutně pro $x \in (-1, 1]$ 14)ano 15)ano 16)ne 17) ∞ 18) $\max\{a, b\}$ 19) $\sqrt{2}$ 20) $(-2, 2)$ 21) $[-1, 1]$

22) $[-\frac{1}{e}, \frac{1}{e}]$ 23) $\frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - (-2)^n)x^n, |x| < \frac{1}{2}$ 24) $\frac{1}{\sqrt{5}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^{n+1} + (-1)^n \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right)^{n+1} \right) x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, kde

$\{a_n\}$ je Fibonacciho posloupnost 1,1,2,3,5,8,13,21,..., $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$, $|x| < \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 25) $\sum_{n=0}^{\infty} (\cos \frac{n\pi}{3})x^n, |x| < 1$

26) $\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(n + \frac{1-(-1)^n}{2} \right) x^n, |x| < 1$ 27) $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)!!}{(2n)!!} x^{2n}, |x| < 1$ 28) $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n}}{2n(2n-1)}, |x| \leq 1$

29) $e^{\frac{x}{2}} \left(1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{4}\right)$ 30) $\ln \frac{1}{1-x}, -1 \leq x < 1$ 31) $2x \operatorname{arctg} x - \ln(1+x^2), |x| \leq 1$ 32) $\frac{1+x}{(1-x)^3}, |x| < 1$ 33) $e^{x^2}(1+2x^2)$

34) $\frac{\ln(1-x)}{x} + \frac{1}{1-x}, |x| < 1$ 35) $\frac{1}{3} \ln 2 + \frac{\sqrt{3}}{9}\pi$ 36) $\frac{3}{2}\sqrt{e}$ 37) $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 38) $\frac{1}{2e}$ 39) 0.001 40) 0.364 41) 0.1 42) $-\frac{1}{12}$ 43) $\frac{1}{6}$

44) $\frac{1}{2}$

8.5 Kontrolní otázky

1) **Uvedte Definicí x.y.z;**

- definici (definovaný pojem) vysvětlete
- ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
- presentujte přehled základních vlastností
- charakterizujte teoretický význam a případně praktické užití

2) **Formulujte Větu x.y.z;**

- vysvětlete předpoklady
- vysvětlete tvrzení
- větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
- uvedte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
- presentujte teoretický a případně praktický význam

- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
- popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 9

Fourierovy řady

9.1 Hilbertův prostor

9.1.1 Definice

Buď V reálný vektorový prostor a $(\cdot | \cdot) : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ zobrazení, které pro všechna $u, v, w \in V$ splňuje podmínky:

$$(U1) \quad u \neq 0 \Rightarrow (u | u) > 0,$$

$$(U2) \quad (u | v) = (v | u),$$

$$(U3) \quad (\alpha u | v) = \alpha (u | v),$$

$$(U4) \quad (u + v | w) = (u | w) + (v | w).$$

Zobrazení $(\cdot | \cdot)$ se nazývá *skalární* (nebo též *vnitřní*) *součin vektorů*.

9.1.2 Poznámky

$$1. \quad u = 0 \Leftrightarrow (u | u) = 0$$

D.: Je-li $u = 0$ pak $u = 0v$ pro libovolný vektor $v \in V$ a tedy podle (U3) je

$$(u | u) = (0v | u) = 0 (v | u) = 0$$

Je-li $(u | u) = 0$, podle (U1) nemůže být $u \neq 0$. \square

$$2. \quad (u | \alpha v) = \alpha (u | v)$$

$$\mathbf{D.}: \quad (u | \alpha v) = (\alpha v | u) = \alpha (v | u) = \alpha (u | v)$$

První rovnost plyne z (U2), druhá z (U3) a třetí opět z (U2). \square

$$3. \quad (u | v + w) = (u | v) + (u | w)$$

$$\mathbf{D.}: \quad (u | v + w) = (v + w | u) = (v | u) + (w | u) = (u | v) + (u | w)$$

První rovnost plyne z (U2), druhá z (U4) a třetí opět z (U2). \square

9.1.3 Věta (Cauchyova [1789 – 1857] - Bunjakovského [1804 – 1889] - Schwarzova [1843 – 1921] nerovnost)

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$. Pak pro všechna $u, v \in V$ platí

$$|(u | v)| \leq \sqrt{(u | u)(v | v)},$$

přičemž rovnost nastane právě tehdy, když vektory u, v jsou lineárně závislé.

D.: Necht' $(u | v) \neq 0$. Pro každé $\alpha \in \mathbb{R}$ podle (U1), 9.1.2.1 a pravidel pro počítání se skalárním součinem platí

$$0 \leq (\alpha u + v | \alpha u + v) = \alpha^2 (u | u) + 2\alpha (u | v) + (v | v),$$

což znamená, že kvadratická rovnice s neznámou α

$$(u | u) \alpha^2 + 2(u | v) \alpha + (v | v) = 0 \quad (9.1)$$

má nejvýše jeden reálný kořen, tedy $4(u | v)^2 - 4(u | u)(v | v) \leq 0$, neboť koeficient u α^2 je kladný. Odtud plyne dokazovaná nerovnost.

Ukážeme, že jsou-li vektory u, v lineárně závislé, nastane ve Schwarzově nerovnosti rovnost. Necht' tedy $v = \beta u$, pak

$$\begin{aligned} |(u | v)| &= |\beta(u | u)| = \sqrt{\beta^2 (u | u)(u | u)} = \sqrt{(u | u)(\beta u | \beta u)} = \\ &= \sqrt{(u | u)(v | v)}. \end{aligned}$$

Nakonec ukážeme, že nastává-li ve Schwarzově nerovnosti rovnost, jsou vektory u, v lineárně závislé. Necht' tedy $(u | v)^2 = (u | u)(v | v)$.

Je-li $(u | u) \neq 0$, má rovnice (9.1) kořen $\alpha = -\frac{(u | v)}{(u | u)}$ a pro takové α je $(\alpha u + v | \alpha u + v) = 0$, což podle 9.1.2.1 znamená, že $\alpha u + v = 0$, neboli $v = -\alpha u$.

Je-li $(u | u) = 0$, je tvrzení triviální. \square

9.1.4 Věta

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$. Pro $u \in V$ položme $\|u\| = \sqrt{(u | u)}$. Pak pro všechna $u, v \in V, \alpha \in \mathbb{R}$ platí

$$(N1) \quad u \neq 0 \Leftrightarrow \|u\| > 0,$$

$$(N2) \quad \|\alpha u\| = |\alpha| \|u\|,$$

$$(N3) \quad \|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|.$$

D.: Jediné netriviální tvrzení je (N3). S využitím 9.1.3 dostaneme:

$$\begin{aligned} \|u + v\|^2 &= (u + v | u + v) = (u | u) + 2(u | v) + (v | v) = \\ &= \|u\|^2 + 2|(u | v)| + \|v\|^2 \leq \|u\|^2 + 2\sqrt{(u | u)(v | v)} + \|v\|^2 = (\|u\| + \|v\|)^2. \end{aligned}$$

\square

Cauchyovu - Bunjakovského - Schwarzovu nerovnost lze zapsat:

$$|(u | v)| \leq \|u\| \|v\| \quad \text{nebo} \quad (u | v)^2 \leq \|u\|^2 \|v\|^2.$$

9.1.5 Definice

Buď V reálný vektorový prostor a $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}$ zobrazení, které pro všechna $u, v \in V, \alpha \in \mathbb{R}$ splňuje podmínky (N1), (N2), (N3) z 9.1.4. Pak $\|\cdot\|$ se nazývá *norma* (na vektorovém prostoru V).

9.1.6 Věta

Buď V reálný vektorový prostor s normou $\|\cdot\|$. Definujme zobrazení $\rho : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ předpisem $\rho(u, v) = \|u - v\|$. Pak ρ je metrika na V .

D.: Axiomy totožnosti a symetrie jsou zřejmé. Trojúhelníková nerovnost plyne z (N3):

$$\rho(u, w) = \|u - w\| = \|u - v + v - w\| \leq \|u - v\| + \|v - w\| = \rho(u, v) + \rho(v, w). \quad \square$$

Je-li V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$, budeme V uvažovat současně s normou zavedenou v 9.1.4 a s metrikou zavedenou v 9.1.6.

9.1.7 Věta

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$, pak zobrazení $(\cdot | \cdot) : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ je spojité.

D.: Na $V \times V$ zavedeme metriku ρ_2 předpisem $\rho_2((u_1, v_1), (u_2, v_2)) = \sqrt{\|u_1 - u_2\|^2 + \|v_1 - v_2\|^2}$.
Pro všechny dvojice $(u_1, v_1), (u_2, v_2) \in V \times V$ platí

$$\|u_1 - u_2\| \leq \rho_2((u_1, v_1), (u_2, v_2)), \quad \|v_1 - v_2\| \leq \rho_2((u_1, v_1), (u_2, v_2)).$$

Buď $(u_0, v_0) \in V \times V$ libovolná dvojice a $\varepsilon > 0$ libovolné číslo. Položme

$$\delta = \frac{\sqrt{(\|u_0\| + \|v_0\|)^2 + 2\varepsilon} - \|u_0\| - \|v_0\|}{2}.$$

Pak $\delta > 0$ a $\delta^2 + (\|u_0\| + \|v_0\|)\delta = \frac{\varepsilon}{2}$.

Buď dále $(u_1, v_1) \in V \times V$ libovolná dvojice taková, že $\rho_2((u_1, v_1), (u_0, v_0)) < \delta$. Pak s využitím 9.1.3 dostaneme

$$\begin{aligned} |(u_1 | v_1) - (u_0 | v_0)| &= |(u_1 - u_0 | v_1 - v_0) + (u_0 | v_1 - v_0) + (u_1 - u_0 | v_0)| \leq \\ &\leq |(u_1 - u_0 | v_1 - v_0)| + |(u_0 | v_1 - v_0)| + |(u_1 - u_0 | v_0)| \leq \\ &\leq \|u_1 - u_0\| \|v_1 - v_0\| + \|u_0\| \|v_1 - v_0\| + \|v_0\| \|u_1 - u_0\| \leq \\ &\leq \delta^2 + \|u_0\| \delta + \|v_0\| \delta = \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon, \end{aligned}$$

což znamená, že zobrazení $(\cdot | \cdot)$ je spojité v (u_0, v_0) . Poněvadž (u_0, v_0) byla libovolná dvojice z $V \times V$, je toto zobrazení spojité na $V \times V$. \square

9.1.8 Důsledek

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$ a $\{v_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost vektorů taková, že $\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = v$. Pak $\lim_{n \rightarrow \infty} \|v_n\| = \|v\|$ a pro libovolný vektor $u \in V$ platí $\lim_{n \rightarrow \infty} (v_n | u) = (v | u)$.

D.: Plyne z 11.5.3. \square

9.1.9 Definice

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$. Řekneme, že vektory $u, v \in V$ jsou *ortogonální* a píšeme $u \perp v$, jestliže $u \neq 0 \neq v$ a $(u | v) = 0$.

Řekneme, že množina $S \subseteq V$ je *ortogonální*, jestliže pro každé dva různé vektory $u, v \in S$ je $u \perp v$. Jestliže navíc pro každý vektor $u \in S$ platí $\|u\| = 1$, nazývá se množina S *ortonormální*.

Je-li množina S ortogonální, je množina $\left\{ \frac{1}{\|u\|} u : u \in S \right\}$ zřejmě ortonormální.

Označení: Je-li V vektorový prostor a $S \subseteq V$, pak podprostor generovaný množinou S (lineární obal množiny S , množinu všech lineárních kombinací vektorů z S) označíme $\text{Lin}(S)$.
Mohutnost množiny M označíme $\text{card } M$.

9.1.10 Věta (Gramova [1850–1916] - Schmidtova [1876–1959] ortogonalizace)

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$ a $S \subseteq V$ konečná nebo spočetná lineárně nezávislá množina. Pak existuje ortonormální množina $R \subseteq V$ taková, že $\text{Lin}(S) = \text{Lin}(R)$ a $\text{card } S = \text{card } R$.

D.: Nechť $S = \{u_1, u_2, \dots\}$. Definujme vektory x_1, x_2, \dots a u_1, u_2, \dots takto:

$$\begin{aligned} x_1 &= u_1 & v_1 &= \frac{1}{\|x_1\|} x_1 \\ x_2 &= u_2 - (u_2 | v_1) v_1 & v_2 &= \frac{1}{\|x_2\|} x_2 \\ &\vdots & &\vdots \\ x_{k+1} &= u_{k+1} - \sum_{i=1}^k (u_{k+1} | v_i) v_i & v_{k+1} &= \frac{1}{\|x_{k+1}\|} x_{k+1} \\ &\vdots & &\vdots \end{aligned}$$

Tento postup končí, je-li množina S konečná vyčerpáním všech jejích prvků. Jinak můžeme neomezeně pokračovat. Položíme $R = \{v_1, v_2, \dots\}$. Zřejmě je $\text{card } S = \text{card } R$.

Úplnou indukcí ověříme, že vektor v_n je lineární kombinací vektorů u_1, u_2, \dots, u_n a naopak, vektor u_n je lineární kombinací vektorů v_1, v_2, \dots, v_n . Tedy $\text{Lin}(S) = \text{Lin}(R)$.

Je-li množina $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ ortogonální, tak pro každé $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ platí

$$\begin{aligned} (x_{k+1} | x_j) &= \left(u_{k+1} - \sum_{i=1}^k (u_{k+1} | v_i) v_i \mid x_j \right) = \\ &= (u_{k+1} | x_j) - \sum_{i=1}^k (u_{k+1} | v_i) (v_i | x_j) = \\ &= (u_{k+1} | x_j) - \sum_{i=1}^k (u_{k+1} | x_i) \frac{1}{\|x_i\|^2} (x_i | x_j) = \\ &= (u_{k+1} | x_j) - (u_{k+1} | x_j) = 0. \end{aligned}$$

Tedy $x_{k+1} \perp x_j$ pro každé $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, což znamená, že množina $\{x_1, x_2, \dots, x_k, x_{k+1}\}$ je ortogonální. Z principu matematické indukce plyne, že množina $\{x_1, x_2, \dots\}$ je ortogonální a tedy množina R je ortonormální. \square

9.1.11 Poznámka

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$ a $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost vektorů z V . Pro každé $n \in \mathbb{N}$ položme $s_n = \sum_{i=1}^n u_i$. Řekneme, že nekonečná řada vektorů $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ konverguje k vektoru s a píšeme

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n = s, \text{ jestliže } \lim_{n \rightarrow \infty} s_n = s \text{ v prostoru s metrikou zavedenou v 9.1.4.}$$

9.1.12 Věta

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot | \cdot)$, $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ ortonormální posloupnost vektorů z V a $\{\gamma_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost reálných čísel.

- Je-li prostor V úplný a číselná řada $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2$ konverguje, pak také řada vektorů $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n u_n$ konverguje.
- Jestliže řada vektorů $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n u_n$ konverguje k vektoru $v \in V$, pak číselná řada $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2$ konverguje a pro každé $n \in \mathbb{N}$ platí $\gamma_n = (v | u_n)$.

D.: Označme $s_n = \sum_{k=1}^n \gamma_k u_k$.

Nechť V je úplný a $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2$ konverguje. Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Podle 7.1.4 existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro

$n \geq n_0$, $m \in \mathbb{N}$ je $\left| \sum_{k=n+1}^{n+m} \gamma_k^2 \right| < \varepsilon$. Pro $n \geq n_0$, $p \geq n_0$, $p > n$ je tedy

$$\begin{aligned} \|s_p - s_n\|^2 &= \left\| \sum_{k=n+1}^p \gamma_k u_k \right\|^2 = \left(\sum_{k=n+1}^p \gamma_k u_k \mid \sum_{k=n+1}^p \gamma_k u_k \right) = \\ &= \sum_{k=n+1}^p \sum_{j=n+1}^p \gamma_k \gamma_j (u_k \mid u_j) = \sum_{k=n+1}^p \gamma_k^2 < \varepsilon, \end{aligned}$$

což znamená, že posloupnost $\{s_n\}_{n=1}^\infty$ je cauchyovská a protože je V úplný, je tato posloupnost konvergentní.

Nechť $\sum_{n=1}^\infty \gamma_n u_n = v \in V$. Kdyby $\sum_{n=1}^\infty \gamma_n^2 = \infty$, pak by z analogického výpočtu jako v předchozím kroku vyplynulo, že posloupnost $\{s_n\}_{n=1}^\infty$ by nebyla cauchyovská, což by byl spor s její předpokládanou konvergencí.

S využitím 9.1.8 dostaneme

$$(v \mid u_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i u_i \mid u_k \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \gamma_i (u_i \mid u_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_k = \gamma_k.$$

□

9.1.13 Definice

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot \mid \cdot)$, $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ ortonormální posloupnost vektorů z V a $v \in V$. Čísla $\gamma_n = (v \mid u_n)$ se nazývají *Fourierovy koeficienty vektoru v vzhledem k ortonormální posloupnosti $\{u_n\}_{n=1}^\infty$* a řada $\sum_{n=1}^\infty \gamma_n u_n$ se nazývá *Fourierova řada vektoru v vzhledem k ortonormální posloupnosti $\{u_n\}_{n=1}^\infty$* .

9.1.14 Věta

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot \mid \cdot)$, $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ ortonormální posloupnost vektorů z V , $v \in V$, $\{\gamma_n\}_{n=1}^\infty$ posloupnost Fourierových koeficientů vektoru v vzhledem k posloupnosti $\{u_n\}_{n=1}^\infty$ a $\{\beta_n\}_{n=1}^\infty$ libovolná posloupnost reálných čísel. Pak pro každé $n \in \mathbb{N}$ platí nerovnost

$$\left\| v - \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i \right\| \leq \left\| v - \sum_{i=1}^n \beta_i u_i \right\|$$

(mezi všemi lineárními kombinacemi vektorů u_1, u_2, \dots, u_n má od vektoru v nejmenší vzdálenost ta, jejíž koeficienty jsou Fourierovými koeficienty vektoru v) a

$$\left\| v - \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i \right\|^2 = \|v\|^2 - \sum_{i=1}^n \gamma_i^2$$

(Besselova identita).

D.: Dokazovaná nerovnost i Besselova identita plynou z rovnosti

$$\begin{aligned}
\left\| v - \sum_{i=1}^n \beta_i u_i \right\|^2 &= \left(v - \sum_{i=1}^n \beta_i u_i \mid v - \sum_{i=1}^n \beta_i u_i \right) = \\
&= \|v\|^2 - \sum_{i=1}^n \beta_i (u_i \mid v) - \sum_{i=1}^n \beta_i (v \mid u_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_i \beta_j (u_i \mid u_j) = \\
&= \|v\|^2 - 2 \sum_{i=1}^n \beta_i \gamma_i + \sum_{i=1}^n \beta_i^2 = \|v\|^2 + \sum_{i=1}^n (\beta_i^2 - 2\beta_i \gamma_i) = \\
&= \|v\|^2 + \sum_{i=1}^n ((\beta_i - \gamma_i)^2 - \gamma_i^2) = \|v\|^2 - \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 + \sum_{i=1}^n (\beta_i - \gamma_i)^2.
\end{aligned}$$

□

9.1.15 Důsledek (Besselova [1784 – 1846] nerovnost)

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot \mid \cdot)$, $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ ortonormální posloupnost vektorů z V , $v \in V$, $\{\gamma_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost Fourierových koeficientů vektoru v vzhledem k posloupnosti $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$. Pak platí

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \leq \|v\|^2.$$

Z Besselovy nerovnosti a z 9.1.12 plyne, že v úplném prostoru Fourierova řada libovolného vektoru konverguje.

9.1.16 Věta

Buď V reálný vektorový prostor se skalárním součinem $(\cdot \mid \cdot)$, který je úplný, $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ ortonormální posloupnost vektorů z V a $v \in V$. Fourierova řada $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n u_n$ vektoru v vzhledem k $\{u_n\}_{n=1}^{\infty}$ konverguje k vektoru v právě tehdy, když platí

$$\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 = \|v\|^2$$

(Parsevalova rovnost).

D.: Podle 9.1.8 a 9.1.14 platí

$$\left\| v - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n u_n \right\|^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\| v - \sum_{i=1}^n \gamma_i u_i \right\|^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\|v\|^2 - \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \right) = \|v\|^2 - \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2.$$

□

9.1.17 Definice

Reálný vektorový prostor, který je úplný a v němž existuje nekonečná ortonormální podmnožina se nazývá *Hilbertův prostor*.

9.1.18 Příklad

Nechť ℓ^2 je množina posloupností $\{\alpha_i\}_{i=1}^{\infty}$ takových, že řada $\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i^2$ konverguje.

Jsou-li $\{\alpha_i\}_{i=1}^{\infty}, \{\beta_i\}_{i=1}^{\infty} \in \ell^2$ pak řada $\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \beta_i$ konverguje absolutně.

D.: $|\alpha_i \beta_i| \leq \max\{\alpha_i^2, \beta_i^2\}$
 $\sum_{i=1}^k \max\{\alpha_i^2, \beta_i^2\} \leq \sum_{i=1}^k \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_i^2 \leq \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i^2 < \infty.$

Řada s nezápornými členy $\sum_{i=1}^{\infty} \max\{\alpha_i^2, \beta_i^2\}$ má ohraničenou posloupnost částečných součtů. Podle 7.2.1

tato řada konverguje, takže podle 7.2.4 konverguje i řada $\sum_{i=1}^{\infty} |\alpha_i \beta_i|$. \square

ℓ^2 tvoří reálný vektorový prostor a lze snadno ověřit, že zobrazení $(\cdot | \cdot) : \ell^2 \times \ell^2 \rightarrow \mathbb{R}$ definované pro $u = \{\alpha_i\}_{i=1}^{\infty} \in \ell^2$, $v = \{\beta_i\}_{i=1}^{\infty} \in \ell^2$ předpisem $(u | v) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \beta_i$ je skalární součin.

Položme $e_n = \{\delta_{ni}\}_{i=1}^{\infty}$, kde $\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$. Pak zřejmě pro každé $n \in \mathbb{N}$ je $e_n \in \ell^2$, $\|e_n\| = 1$,

$(e_n | e_m) = 0$ pro $n \neq m$. Tedy $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ je ortonormální posloupnost v ℓ^2 .

Buď $u = \{\alpha_i\}_{i=1}^{\infty} \in \ell^2$ libovolný vektor. Fourierovy koeficienty tohoto vektoru vzhledem k $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ jsou

$$\gamma_n = (u | e_n) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \delta_{ni} = \alpha_n.$$

Dále

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left\| u - \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i \right\|^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(u - \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i \mid u - \sum_{i=1}^n \alpha_i e_i \right) = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left((u | u) - 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i (u | e_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j (e_i | e_j) \right) = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=n+1}^{\infty} \alpha_i^2 = 0, \end{aligned}$$

takže Fourierova řada libovolného vektoru $u \in \ell^2$ konverguje k u .

9.2 Prostor $\mathcal{L}^2(a, b)$

Nechť $a, b \in \mathbb{R}^*$, $a < b$.

Symbolem $\mathcal{C}^2(a, b)$ označíme množinu všech funkcí f spojitých na intervalu (a, b) , pro něž $\int_a^b (f(x))^2 dx < \infty$. Jsou-li $a, b \in \mathbb{R}$ a $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) \in \mathbb{R}$, $\lim_{x \rightarrow b^-} f(x) \in \mathbb{R}$, je nerovnost triviální. V opačném případě říká, že příslušný nevlastní integrál konverguje.

9.2.1 Poznámky

1. Jsou-li $f, g \in \mathcal{C}^2(a, b)$, pak $\int_a^b |f(x)g(x)| dx < \infty$ a $-\infty < \int_a^b f(x)g(x) dx < \infty$.

D.: Nechť uvažované integrály jsou nevlastní. (V opačném případě by tvrzení bylo triviální.)

$$\int_a^b |f(x)g(x)| dx \leq \int_a^b \max\{(f(x))^2, (g(x))^2\} dx \leq \int_a^b (f(x))^2 dx + \int_a^b (g(x))^2 dx < \infty.$$

Druhá nerovnost plyne z 5.4.8. \square

2. Jsou-li $f, g \in \mathcal{C}^2(a, b)$, pak také $f + g \in \mathcal{C}^2(a, b)$ a pro každé $\alpha \in \mathbb{R}$ je $\alpha f \in \mathcal{C}^2(a, b)$.

D.:

$$\begin{aligned}\int_a^b (f(x) + g(x))^2 dx &= \int_a^b (f(x))^2 dx + 2 \int_a^b f(x)g(x) dx + \int_a^b (g(x))^2 dx \leq \\ &\leq \int_a^b (f(x))^2 dx + 2 \left| \int_a^b f(x)g(x) dx \right| + \int_a^b (g(x))^2 dx \leq \\ &\leq \int_a^b (f(x))^2 dx + 2 \int_a^b |f(x)g(x)| dx + \int_a^b (g(x))^2 dx < \infty, \\ \int_a^b (\alpha f(x))^2 dx &= \alpha^2 \int_a^b (f(x))^2 dx < \infty.\end{aligned}$$

□

3. $\mathcal{C}^2(a, b)$ tvoří reálný vektorový prostor, nulovým vektorem je funkce $f \equiv 0$. (Budeme ji značit 0.)

D.: Plyne bezprostředně z předchozího tvrzení. □

4. Zobrazení $\Phi : \mathcal{C}^2(a, b) \times \mathcal{C}^2(a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ dané předpisem $\Phi(f, g) = \int_a^b f(x)g(x) dx$ je skalárním součinem.

D.: Nejprve poznamenejme, že zobrazení Φ je podle 1. definováno korektně.

Ověříme platnost podmínky (U1):

Nechť $f \neq 0$. Pak existuje $x_0 \in (a, b)$ takové, že $f(x_0) \neq 0$ a ze spojitosti funkce f plyne existence okolí $\mathcal{O}(x_0) = (x_0 - \delta, x_0 + \delta) \subseteq (a, b)$ bodu x_0 takového, že $(f(x_0))^2 \geq \varepsilon > 0$ pro všechna $x \in \mathcal{O}(x_0)$.

Podle 5.2.1 je $\int_{x_0-\delta}^{x_0+\delta} (f(x))^2 dx \geq 2\varepsilon\delta$ a tedy

$$\Phi(f, f) = \int_a^b (f(x))^2 dx = \int_a^{x_0-\delta} (f(x))^2 dx + \int_{x_0-\delta}^{x_0+\delta} (f(x))^2 dx + \int_{x_0+\delta}^b (f(x))^2 dx \geq 0 + 2\varepsilon\delta + 0 > 0.$$

Platnost podmínek (U2) – (U4) je zřejmá. □

5. Jsou-li $f, g \in \mathcal{C}^2(a, b)$, pak $\left| \int_a^b f(x)g(x) dx \right| \leq \sqrt{\int_a^b (f(x))^2 dx} \sqrt{\int_a^b (g(x))^2 dx}$.

D.: Plyne z předchozího tvrzení a z 9.1.3. □

9.2.2 Definice

Buď f funkce definovaná na intervalu (a, b) .

Řekneme, že funkce f je *po částech spojitá*, je-li množina jejích bodů nespojitosti konečná.

Řekneme, že funkce f je *po částech monotonní*, existují-li čísla $x_0, x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^*$ taková, že $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ a funkce f je monotonní na každém z intervalů (x_{i-1}, x_i) , $i = 1, 2, \dots, n$.

Symbolem $\tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ označíme množinu všech po částech spojitých funkcí f definovaných na intervalu (a, b) , pro něž $\int_a^b (f(x))^2 dx < \infty$.

Pro každou funkci $f \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ označíme symbolem $N(f)$ množinu jejích bodů nespojitosti.

9.2.3 Poznámky

1. Na množině $\tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ definujme relaci \sim předpisem: $f \sim g \Leftrightarrow \int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx = 0$. Pak \sim je relací ekvivalence na množině $\tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$.

D.: Reflexivita a symetrie jsou zřejmé.

Nechť $f \sim g$, $g \sim h$. Budťe $x_0, x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^*$ taková, že $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ a $N(f) \cup N(g) \cup N(h) \subseteq \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$. Pak každá z funkcí f , g , h je spojitá v každém intervalu (x_{i-1}, x_i) a platí $\int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - g(x))^2 dx = \int_{x_{i-1}}^{x_i} (g(x) - h(x))^2 dx = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$.

S využitím 9.2.1.5 dostaneme

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int_a^b (f(x) - h(x))^2 dx = \int_a^b (f(x) - g(x) + g(x) - h(x))^2 dx = \\ &= \int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx + 2 \int_a^b (f(x) - g(x))(g(x) - h(x)) dx + \int_a^b (g(x) - h(x))^2 dx = \\ &= 0 + 2 \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - g(x))(g(x) - h(x)) dx + 0 \leq \\ &\leq 2 \sum_{n=1}^n \left| \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - g(x))(g(x) - h(x)) dx \right| \leq \\ &\leq 2 \sum_{n=1}^n \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - g(x))^2 dx} \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (g(x) - h(x))^2 dx} = 0. \end{aligned}$$

takže $\int_a^b (f(x) - h(x))^2 dx = 0$, což znamená $f \sim h$. \square

2. Jsou-li $f, g, f_1, g_1 \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ a platí $f \sim f_1$, $g \sim g_1$, pak $-\infty < \int_a^b f(x)g(x) dx = \int_a^b f_1(x)g_1(x) dx < \infty$.

D.: Budťe $x_0, x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^*$ taková, že $a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ a $N(f) \cup N(g) \cup N(f_1) \cup N(g_1) \subseteq \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$.

Pak $\int_a^b f(x)g(x) dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)g(x) dx$ a $f, g \in \mathcal{C}^2(x_{i-1}, x_i)$ pro každé $i = 1, 2, \dots, n$. Z 9.2.1.1 tedy

plyne $-\infty < \int_a^b f(x)g(x) dx < \infty$.

Dále podle 9.2.1.2 $f, g_1, f - f_1, g - g_1 \in \mathcal{C}^2(x_{i-1}, x_i)$ a $\int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f_1(x))^2 dx = \int_{x_{i-1}}^{x_i} (g(x) - g_1(x))^2 dx = 0$ pro každé $i = 1, 2, \dots, n$. S využitím 9.2.1.5 dostaneme

$$\begin{aligned} 0 &\leq \left| \int_a^b f(x)g(x) dx - \int_a^b f_1(x)g_1(x) dx \right| = \left| \int_a^b (f(x)g(x) - f_1(x)g_1(x)) dx \right| = \\ &= \left| \int_a^b (f(x)g(x) - f(x)g_1(x) + f(x)g_1(x) - f_1(x)g_1(x)) dx \right| = \\ &= \left| \int_a^b f(x)(g(x) - g_1(x)) dx + \int_a^b (f(x) - f_1(x))g_1(x) dx \right| \leq \\ &\leq \left| \int_a^b f(x)(g(x) - g_1(x)) dx \right| + \left| \int_a^b (f(x) - f_1(x))g_1(x) dx \right| = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left| \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)(g(x) - g_1(x))dx \right| + \left| \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f_1(x))g_1(x)dx \right| \leq \\
&= \sum_{i=1}^n \left| \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)(g(x) - g_1(x))dx \right| + \sum_{i=1}^n \left| \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f_1(x))g_1(x)dx \right| \leq \\
&\leq \sum_{i=1}^n \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x))^2 dx} \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (g(x) - g_1(x))^2 dx} + \\
&\quad + \sum_{i=1}^n \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f_1(x))^2 dx} \sqrt{\int_{x_{i-1}}^{x_i} (g_1(x))^2 dx} = 0.
\end{aligned}$$

Odtud plyne rovnost mezi integrály. \square

3. Jsou-li $f_1, g_1, f_2, g_2 \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ takové, že $f_1 \sim f_2$, $g_1 \sim g_2$ a $\alpha \in \mathbb{R}$, pak $f_1 + g_1 \sim f_2 + g_2$ a $\alpha f_1 \sim \alpha f_2$.

D.: $0 = \int_a^b (f_1(x) - f_2(x))^2 dx = \int_a^b ((f_1(x) - f_2(x)) - 0)^2 dx$, takže $f_1 - f_2 \sim 0$. Podle předchozího je $\int_a^b (f_1(x) - f_2(x))(g_1(x) - g_2(x)) dx = \int_a^b 0(g_1(x) - g_2(x)) dx = 0$, tedy

$$\begin{aligned}
&\int_a^b ((f_1(x) + g_1(x)) - (f_2(x) + g_2(x)))^2 dx = \int_a^b ((f_1(x) - f_2(x)) + (g_1(x) - g_2(x)))^2 dx = \\
&= \int_a^b (f_1(x) - f_2(x))^2 dx + 2 \int_a^b (f_1(x) - f_2(x))(g_1(x) - g_2(x)) dx + \int_a^b (g_1(x) - g_2(x))^2 dx = 0.
\end{aligned}$$

Dále

$$\int_a^b (\alpha f_1(x) - \alpha f_2(x))^2 dx = \alpha^2 \int_a^b (f_1(x) - f_2(x))^2 dx = 0.$$

\square

Pro každé $f \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ položme $\langle f \rangle = \{h \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b) : f \sim h\}$. Neboli: množiny $\langle f \rangle$ jsou třídy rozkladu množiny $\tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$ podle ekvivalence \sim , $\langle f \rangle \in \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)/\sim$; $\langle f \rangle = \langle g \rangle \Leftrightarrow f \sim g$.

Označme $\mathcal{L}^2(a, b) = \tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)/\sim$.

Dále pro $\langle f \rangle, \langle g \rangle \in \mathcal{L}^2(a, b)$, $\alpha \in \mathbb{R}$ klademe

$$\begin{aligned}
\langle f \rangle + \langle g \rangle &= \langle f_1 + g_1 \rangle && \text{(součet)} \\
\alpha \langle f \rangle &= \langle \alpha f \rangle && \text{(násobení skalárem)}
\end{aligned}$$

přičemž $f_1 \in \langle f \rangle$, $g_1 \in \langle g \rangle$. Podle 9.2.3.3 součet ani násobení skalárem nezávisí na výběru representantů f_1, g_1 .

Množina $\mathcal{L}^2(a, b)$ tvoří reálný vektorový prostor. Jeho nulovým prvkem $\langle 0 \rangle$ je třída obsahující funkci $f \equiv 0$.

Zobrazení $(\cdot | \cdot) : \mathcal{L}^2(a, b) \times \mathcal{L}^2(a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ definované pro $\langle f \rangle, \langle g \rangle \in \mathcal{L}^2(a, b)$ předpisem

$$(\langle f \rangle | \langle g \rangle) = \int_a^b f_1(x)g_1(x)dx,$$

kde $f_1 \in \langle f \rangle$, $g_1 \in \langle g \rangle$, nezávisí podle 9.2.3.2 na výběru representantů f_1, g_1 .

Nechť $f_1 \in \langle f \rangle$. Pak platí

$$(\langle f \rangle | \langle f \rangle) = \int_a^b (f_1(x))^2 dx \geq 0,$$

$$(\langle f \rangle | \langle f \rangle) = 0 \Rightarrow \int_a^b (f_1(x))^2 dx = 0 \Rightarrow f_1 \sim 0 \Rightarrow 0 \in \langle f \rangle \Rightarrow \langle f \rangle = 0.$$

Je tedy splněna podmínka (U1) z 9.1.1. Platnost podmínek (U2) – (U4) je zřejmá. Zobrazení $(\cdot | \cdot)$ je skalárním součinem na $\mathcal{L}^2(a, b)$.

V dalším budeme pro zjednodušení zápisu prvky množiny $\mathcal{L}^2(a, b)$ značit stejně jako funkce z množiny $\tilde{\mathcal{L}}^2(a, b)$. (Třídy rozkladu ztotožňujeme s representanty.)

Vzdálenost dvou funkcí f, g v prostoru $\mathcal{L}^2(a, b)$ je

$$\|f - g\| = \sqrt{\int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx}$$

a nazývá se *střední odchylka funkcí* f, g .

Konvergence posloupnosti funkcí v prostoru $\mathcal{L}^2(a, b)$ se nazývá *konvergence (posloupnosti funkcí) podle středu*.

9.3 Fourierovy řady vzhledem k trigonometrickému systému

Uvažujme prostor $\mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$ a posloupnost funkcí

$$\{1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots\}.$$

Platí

$$(1 | 1) = \int_{-\pi}^{\pi} dx = 2\pi,$$

$$(\cos nx | \cos nx) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1 + \cos 2nx}{2} dx = \left[\frac{x}{2} + \frac{\sin 2nx}{4n} \right]_{-\pi}^{\pi} = \pi,$$

$$(\sin nx | \sin nx) = \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 nx dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1 - \cos 2nx}{2} dx = \left[\frac{x}{2} - \frac{\sin 2nx}{4n} \right]_{-\pi}^{\pi} = \pi,$$

$$(1 | \cos nx) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx dx = \left[\frac{1}{n} \sin nx \right]_{-\pi}^{\pi} = 0,$$

$$(1 | \sin nx) = \int_{-\pi}^{\pi} \sin nx dx = \left[-\frac{1}{n} \cos nx \right]_{-\pi}^{\pi} = -\frac{1}{n} ((-1)^n - (-1)^n) = 0,$$

$$(\sin nx | \cos mx) = \int_{-\pi}^{\pi} \sin nx \cos mx dx = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} (\sin(n+m)x + \sin(n-m)x) dx = 0.$$

Odtud plyne, že uvažovaná posloupnost funkcí je ortogonální v prostoru $\mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$ a tedy posloupnost funkcí

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos 2x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin 2x, \dots, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cos nx, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sin nx, \dots \right\}$$

je ortonormální posloupností funkcí v prostoru $\mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$. Tato posloupnost se nazývá *trigonometrický systém funkcí*.

Je-li $f \in \mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$, pak Fourierova řada této funkce vzhledem ke zmíněné ortonormální posloupnosti je

$$\alpha_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\alpha_n \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}} + \beta_n \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}} \right),$$

kde

$$\alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, \quad \alpha_n = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, \quad \beta_n = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Tuto řadu lze zapsat v přehlednějším tvaru

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx),$$

kde

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, \quad n = 1, 2, \dots$$

Z 9.1.16 a 7.3.13 plyne

9.3.1 Věta

Buď $f \in \mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$. Fourierova řada funkce f vzhledem k trigonometrickému systému konverguje k funkci f podle středu (v metrice prostoru $\mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$) právě tehdy, když

$$\frac{a_0^2}{4} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2 = \|f\|^2.$$

Z 9.1.4 a 7.1.5 plyne

9.3.2 Věta

Nechť $f \in \mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$ a $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ jsou Fourierovy koeficienty této funkce vzhledem k trigonometrickému systému. Pak $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0$.

9.3.3 Věta (Dirichlet [1805 – 1859])

Nechť funkce f je ohraničená, po částech spojitá a po částech monotonní na intervalu $[-\pi, \pi]$. Pak její Fourierova řada vzhledem k trigonometrickému systému bodově konverguje na intervalu $[-\pi, \pi]$ k funkci \tilde{f} , přičemž

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x), & x \in (-\pi, \pi), f \text{ je spojitá v } x \\ \frac{1}{2} \left(\lim_{t \rightarrow x-} f(t) + \lim_{t \rightarrow x+} f(t) \right), & x \in (-\pi, \pi), f \text{ není spojitá v } x \\ \frac{1}{2} \left(\lim_{t \rightarrow -\pi+} f(t) + \lim_{t \rightarrow \pi-} f(t) \right), & x \in \{-\pi, \pi\} \end{cases}$$

D.: Viz V. Novák, Nekonečné řady.

Poznamenejme jen, že podle 2.1.15 příslušné jednostranné limity existují. \square

Zřejmě $\tilde{f} \sim f$, t.j. $\tilde{f} = f$ v prostoru $\mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$.

(Bodový) součet Fourierovy řady vzhledem k trigonometrickému systému je 2π -periodická funkce. Tedy (bodový) součet Fourierovy řady je 2π -periodické rozšíření funkce, která je na intervalu $(-\pi, \pi)$ ekvivalentní (ve smyslu 9.2.3.1) funkci f .

Je-li $f \in \mathcal{L}^c(-\pi, \pi)$ sudá funkce, pak $b_n = 0$, $n = 1, 2, \dots$ a Fourierova řada této funkce vzhledem k trigonometrickému systému má tvar

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx \quad \text{kde } a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos nx dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Tato řada se nazývá *kosinová (řada funkce f)*.

Je-li $f \in \mathcal{L}^2(-\pi, \pi)$ lichá funkce, pak $a_n = 0$, $n = 0, 1, 2, \dots$ a Fourierova řada této funkce vzhledem k trigonometrickému systému má tvar

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin nx \quad \text{kde } b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin nx dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Tato řada se nazývá *sinová (řada funkce f)*.

9.3.4 Příklad

Nechť $f(x) = x$ pro $x \in [-\pi, \pi]$. Je to funkce lichá, proto $a_n = 0$, $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x \sin nx dx = \frac{1}{\pi} \left(\left[-\frac{1}{n} x \cos nx \right]_{-\pi}^{\pi} + \frac{1}{n} \int_{-\pi}^{\pi} \cos nx dx \right) = \\ &= \frac{1}{\pi} \left(-\frac{1}{n} \pi \cos n\pi - \frac{1}{n} \pi \cos n\pi \right) + \frac{1}{n^2} [\sin nx]_{-\pi}^{\pi} = \\ &= -\frac{2}{n} \cos n\pi = -\frac{2}{n} (-1)^n = (-1)^{n+1} \frac{2}{n} \end{aligned}$$

Tedy pro $x \in (-\pi, \pi)$ je

$$x = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin nx.$$

Zejména pro $x = \frac{\pi}{2}$ je

$$\frac{\pi}{2} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin \frac{n\pi}{2} = 2 \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots \right) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1},$$

tedy

$$\pi = 4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}.$$

9.3.5 Věta (Dirichlet [1805 – 1859] - Jordan [1838 – 1922])

Nechť funkce f je 2π -periodická, ohraničená, po částech spojitá a po částech monotonní na intervalu $[-\pi, \pi]$. Je-li f spojitá na intervalu (a, b) , pak Fourierova řada funkce f vzhledem k trigonometrickému systému konverguje stejnoměrně k funkci f na každém uzavřeném podintervalu intervalu (a, b) .

D.: Viz V. Novák, Nekonečné řady.

Poznamenejme jen, že interval (a, b) nemá žádný vztah k intervalu $[-\pi, \pi]$. \square

9.3.6 Příklad

$f(x) = x^2$ pro $x \in [-\pi, \pi]$. S využitím výsledku 9.3.4 dostaneme

$$\begin{aligned} f(x) &= 2 \int_0^x t dt = 2 \int_0^x \left(2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin nt \right) dt = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \int_0^x \sin ntdt = \\ &= 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \frac{1}{n} [-\cos nt]_0^x = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} (\cos 0 - \cos nx) = \\ &= 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} (1 - \cos nx) = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos nx \end{aligned}$$

(Výpočet je korektní, neboť řada $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} (1 - \cos nx)$ konverguje absolutně.)

Současně platí

$$\frac{a_0}{2} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x^2 dx = \frac{1}{6\pi} [x^3]_{-\pi}^{\pi} = \frac{\pi^2}{3}.$$

Tedy pro $x \in [-\pi, \pi]$ je

$$x^2 = \frac{\pi^2}{3} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos nx.$$

Zejména pro $x = \pi$ je

$$\pi^2 = \frac{\pi^2}{3} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos n\pi = \frac{\pi^2}{3} - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} (-1)^n = \frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2},$$

z čehož

$$\pi^2 = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}.$$

Mimoходом také vyšlo

$$\pi^2 = 12 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}.$$

9.3.7 Fourierovy řady funkcí z prostoru $\mathcal{L}^2(a, b)$

Nechť $f \in \mathcal{L}^2(a, b)$ je ohraničená, po částech spojitá a po částech monotónní. Položme

$g(t) = f\left(\frac{b-a}{2\pi}t + \frac{a+b}{2}\right)$. Pak g je ohraničená, po částech spojitá a po částech monotónní funkce definovaná

na intervalu $[-\pi, \pi]$ a platí $f(x) = g\left(\frac{2x-a-b}{b-a}\pi\right)$. Podle 9.3.3 je

$$\begin{aligned} g(t) &\sim \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n \cos nt + \beta_n \sin nt), \text{ kde} \\ \alpha_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(t) \cos ntdt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \beta_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(t) \sin ntdt, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Substitucí $t = \frac{2x - a - b}{b - a}\pi$, $dt = \frac{2\pi}{b - a}dx$ a při označení $\varphi_n = \frac{2}{b - a}n\pi$, $\psi_n = \frac{b + a}{b - a}n\pi$ dostaneme

$$\cos nt = \cos(\varphi_n x - \psi) = \cos \varphi_n x \cos \psi_n + \sin \varphi_n x \sin \psi_n,$$

$$\sin nt = \sin(\varphi_n x - \psi) = \sin \varphi_n x \cos \psi_n - \cos \varphi_n x \sin \psi_n,$$

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \frac{2}{b - a} \int_a^b g(\varphi_n x - \psi) \cos(\varphi_n x - \psi) dx = \\ &= \frac{2}{b - a} \left(\cos \psi_n \int_a^b f(x) \cos \varphi_n x dx + \sin \psi_n \int_a^b f(x) \sin \varphi_n x dx \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_n &= \frac{2}{b - a} \int_a^b g(\varphi_n x - \psi) \sin(\varphi_n x - \psi) dx = \\ &= \frac{2}{b - a} \left(\cos \psi_n \int_a^b f(x) \sin \varphi_n x dx - \sin \psi_n \int_a^b f(x) \cos \varphi_n x dx \right). \end{aligned}$$

Označme

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{b - a} \int_a^b f(x) \cos \frac{2n\pi}{b - a} x dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\ b_n &= \frac{2}{b - a} \int_a^b f(x) \sin \frac{2n\pi}{b - a} x dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \tag{9.2}$$

Tedy

$$\begin{aligned} f(x) = g\left(\frac{2x - a - b}{b - a}\pi\right) &\sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n \cos \psi_n + b_n \sin \psi_n)(\cos \varphi_n x \cos \psi_n + \sin \varphi_n x \sin \psi_n) + \\ &\quad + (b_n \cos \psi_n - a_n \sin \psi_n)(\sin \varphi_n x \cos \psi_n - \cos \varphi_n x \sin \psi_n)] = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [(\cos \varphi_n x \cos^2 \psi_n + \sin \varphi_n x \sin \psi_n \cos \psi_n - \\ &\quad - \sin \varphi_n x \sin \psi_n \cos \psi_n + \cos \varphi_n x \sin^2 \psi_n) a_n + \\ &\quad + (\cos \varphi_n x \sin \psi_n \cos \psi_n + \sin \varphi_n x \sin^2 \psi_n + \\ &\quad + \sin \varphi_n x \cos^2 \psi_n - \cos \varphi_n x \sin \psi_n \cos \psi_n) b_n] = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \varphi_n x + b_n \sin \varphi_n x). \end{aligned}$$

To znamená, že

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi}{b - a} x + b_n \sin \frac{2n\pi}{b - a} x \right), \tag{9.3}$$

kde koeficienty a_n , b_n jsou dány vztahy (9.2).

Pro bodovou a stejnoměrnou konvergenci řady (9.3) platí věty analogické 9.3.3 a 9.3.5.

9.3.8 Příklad

Definujme funkci (\cdot) zvanou vzdálenost k nejbližšímu celému číslu předpisem $(x) = \min\{x - [x], [x + 1] - x\}$. Tato funkce má zřejmě periodu 1. Najdeme její Fourierovu řadu na intervalu $[0, 1]$.

$$a_0 = 2 \left(\int_0^{\frac{1}{2}} x dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1 - x) dx \right) = 2 \left(\left[\frac{x^2}{2} \right]_0^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{(1 - x)^2}{2} \right]_{\frac{1}{2}}^1 \right) = 2 \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8} \right) = \frac{1}{2},$$

$$\begin{aligned}
a_n &= 2 \left(\int_0^{\frac{1}{2}} x \cos 2n\pi x dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x) \cos 2n\pi x dx \right) = \\
&= 2 \left(\left[\frac{x}{2n\pi} \sin 2n\pi x + \frac{1}{4n^2\pi^2} \cos 2n\pi x \right]_0^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{2n\pi} \sin 2n\pi x - \frac{x}{2n\pi} \sin 2n\pi x - \frac{1}{4n^2\pi^2} \cos 2n\pi x \right]_{\frac{1}{2}}^1 \right) = \\
&= 2 \left(\frac{1}{4n^2\pi^2} \cos n\pi - \frac{1}{4n^2\pi^2} - \frac{1}{4n^2\pi^2} + \frac{1}{4n^2\pi^2} \cos n\pi \right) = \frac{1}{n^2\pi^2} ((-1)^n - 1) = \begin{cases} 0, & n \text{ sudé} \\ -\frac{2}{n^2\pi^2}, & n \text{ liché} \end{cases}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_n &= 2 \left(\int_0^{\frac{1}{2}} x \sin 2n\pi x dx + \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x) \sin 2n\pi x dx \right) = \\
&= 2 \left(\left[\frac{1}{4n^2\pi^2} \sin 2n\pi x - \frac{x}{2n\pi} \cos 2n\pi x \right]_0^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{x}{2n\pi} \cos 2n\pi x - \frac{1}{4n^2\pi^2} \sin 2n\pi x - \frac{1}{2n\pi} \cos 2n\pi x \right]_{\frac{1}{2}}^1 \right) = \\
&= 2 \left(-\frac{1}{4n\pi} \cos n\pi + \frac{1}{2n\pi} - \frac{1}{2n\pi} - \frac{1}{4n\pi} \cos n\pi + \frac{1}{2n\pi} \cos n\pi \right) = 0
\end{aligned}$$

Celkem

$$(x) = \frac{1}{4} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos 2(2n+1)\pi x.$$

Zejména pro $x = 0$ dostaneme

$$0 = \frac{1}{4} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}, \quad \text{tj. } \pi^2 = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}.$$

9.4 Cvičení

Rozviňte ve Fourierovu řadu na intervalu $[-\pi, \pi]$ funkce

1) $f(x) = x^2$ 2) $f(x) = |x|$ 3) $f(x) = |\sin x|$

Rozviňte ve Fourierovu řadu funkce

4) $f(x) = e^x, x \in [-h, h]$ 5) $f(x) = x, x \in [a, a + 2l]$ 6) $f(x) = x \cos x, x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$

Rozviňte ve Fourierovu řadu periodické funkce

7) $f(x) = \operatorname{sgn}(\cos x)$ 8) $f(x) = \arcsin(\sin x)$ 9) $f(x) = x - [x]$

Rozviňte ve Fourierovu řadu 2π -periodické funkce, jestliže

- 10) $f(x) = x$ pro $x \in [0, \pi]$ a f je sudá,
11) $f(x) = x$ pro $x \in [0, \pi]$ a f je lichá,
12) $f(x) = \frac{\pi}{4}$ pro $x \in [0, \pi]$ a f je lichá,
13) $f(x) = \frac{\pi^2}{8} - \frac{\pi x}{4}$ pro $x \in [0, \pi]$ a f je sudá,

a určete součty těchto řad.

Najděte součty řad

14) $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k^2}$ 15) $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2}$
16) $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)^2}$ 17) $1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots$
18) $1 + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} - \frac{1}{11} + \frac{1}{13} + \frac{1}{17} - \dots$ 19) $1 - \frac{1}{5} + \frac{1}{7} - \frac{1}{11} + \frac{1}{13} + \dots$

Výsledky: **1)** $\frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k^2} \cos kx$ **2)** $\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \cos(2k+1)x$ **3)** $\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)(2k+1)} \cos 2kx$

4) $2 \operatorname{sh} h \left[\frac{1}{2h} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{h^2 + (k\pi)^2} (h \cos \frac{k\pi x}{h} - \pi k \sin \frac{k\pi x}{h}) \right]$ **5)** $a + l + \frac{2l}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} (\sin \frac{k\pi a}{l} \cos \frac{k\pi x}{l} - \cos \frac{k\pi a}{l} \sin \frac{k\pi x}{l})$

6) $\frac{16}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} k}{(4k^2-1)^2} \sin 2kx$ 7) $\frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} \cos(2k+1)x$ 8) $\frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} \sin(2k+1)x$ 9) $\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin 2\pi kx}{k}$
10) $\frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} \cos(2k+1)x$ 11) $2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k} \sin kx$ 12) $\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin(2k+1)x}{2k+1}$ 13) $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k-1)x}{(2k-1)^2}$ 14) $\frac{\pi^2}{12}$ 15) $\frac{\pi^2}{6}$
16) $\frac{\pi^2}{8}$ 17) $\frac{\pi}{4}$ 18) $\frac{\pi}{3}$ 19) $\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$

9.5 Kontrolní otázky

- 1) **Uveďte Definicí x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 10

Doplňěk

10.1 Fourierův integrál

Buď f spojitá funkce definovaná na intervalu $(-\infty, \infty)$ taková, že $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ konverguje. Dále buď $\ell > 0$.

Podle 9.3.7 pro každé $x \in \left(-\frac{\ell}{2}, \frac{\ell}{2}\right)$ je

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi}{\ell} x + b_n \sin \frac{2n\pi}{\ell} x \right),$$

kde

$$a_n = \frac{2}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) \cos \frac{2n\pi}{\ell} t dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad b_n = \frac{2}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) \sin \frac{2n\pi}{\ell} t dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

Tedy

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) \left(\cos \frac{2n\pi}{\ell} t \cos \frac{2n\pi}{\ell} x + \sin \frac{2n\pi}{\ell} t \sin \frac{2n\pi}{\ell} x \right) dt = \\ &= \frac{1}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) dt + \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \left(f(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi}{\ell} \cos \frac{2n\pi}{\ell} (t-x) \right) dt. \end{aligned}$$

Abychom dostali vzorec platný pro každé $x \in (-\infty, \infty)$, provedeme limitní přechod $\ell \rightarrow \infty$.

Z konvergence nevlastního integrálu $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ plyne $\lim_{\ell \rightarrow \infty} \left| \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) dt \right| < \infty$ a tedy

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(t) dt = 0.$$

Výraz

$$\sum_{n=1}^m \frac{2\pi}{\ell} \cos \frac{2n\pi}{\ell} (t-x)$$

je integrální součet příslušný k funkci $g(\lambda) = \cos \lambda(t-x)$, dělení $D = \left\{0, \frac{2\pi}{\ell}, \frac{4\pi}{\ell}, \dots, \frac{2m\pi}{\ell}\right\}$ intervalu $\left[0, \frac{2m\pi}{\ell}\right]$ a výběru reprezentantů $\left\{\frac{2\pi}{\ell}, \frac{4\pi}{\ell}, \dots, \frac{2m\pi}{\ell}\right\}$ (sr. 5.1.8). Lze tedy očekávat, že za jistých předpokladů bude platit

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi}{\ell} \cos \frac{2n\pi}{\ell}(t-x) = \int_0^{\infty} \cos \lambda(t-x) d\lambda$$

a také

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \lambda(t-x) dt \right) d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left(\cos \lambda x \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \lambda t dt + \sin \lambda x \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \lambda t dt \right) d\lambda.$$

10.1.1 Věta

Nechť funkce f je definována na intervalu $(-\infty, \infty)$ s případnou výjimkou izolované množiny bodů. Je-li splněna alespoň jedna z podmínek

(i) integrál $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt$ absolutně konverguje,

(ii) funkce f a její derivace jsou po částech spojitě na každém konečném intervalu, přičemž případné body nespojitosti jsou prvního druhu a navíc platí $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$,

pak pro každé $x \in \mathbb{R}$ platí

$$\frac{1}{2} \left(\lim_{t \rightarrow x+} f(t) + \lim_{t \rightarrow x-} f(t) \right) = \int_0^{\infty} (a(\lambda) \cos \lambda x + b(\lambda) \sin \lambda x) d\lambda,$$

kde

$$a(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \lambda t dt, \quad b(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \lambda t dt.$$

D.: V. Jarník, Integrální počet II, str. 524 – 533. (Věta je tam dokázána s poněkud obecnějšími předpoklady.)
□

Zejména je-li f v bodě x spojitá, platí

$$f(x) = \int_0^{\infty} (a(\lambda) \cos \lambda x + b(\lambda) \sin \lambda x) d\lambda.$$

Je-li funkce f sudá, pak

$$a(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(t) \cos \lambda t dt, \quad b(\lambda) \equiv 0,$$

Je-li funkce f lichá, pak

$$a(\lambda) \equiv 0, \quad b(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(t) \sin \lambda t dt.$$

Příklad: Funkci $f(x) = e^{-\alpha x}$, $0 < x < \infty$, $\alpha > 0$ vyjádřit Fourierovým integrálem

a) jako sudou funkci

$$\begin{aligned} a(\lambda) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \cos \lambda t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \operatorname{Re} e^{i\lambda t} dt = \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} e^{(i\lambda - \alpha)t} dt = \\ &= \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} \frac{1}{i\lambda - \alpha} \left[e^{(i\lambda - \alpha)t} \right]_0^{\infty} = \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} \frac{1}{i\lambda - \alpha} = \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} \frac{\alpha + i\lambda}{\alpha^2 + \lambda^2} = \frac{2\alpha}{\pi(\alpha^2 + \lambda^2)} \\ e^{-\alpha x} &= \frac{2\alpha}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\cos \lambda x}{\alpha^2 + \lambda^2} d\lambda \end{aligned}$$

b) jako lichou funkci

$$\begin{aligned} b(\lambda) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \sin \lambda t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} \operatorname{Im} e^{i\lambda t} dt = \frac{2\lambda}{\pi(\alpha^2 + \lambda^2)} \\ e^{-\alpha x} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\lambda \sin \lambda x}{\alpha^2 + \lambda^2} d\lambda \end{aligned}$$

10.2 Aplikace Fourierových řad

Řešení lineární diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními koeficienty a s periodickou pravou stranou

$$x'' + px' + qx = f(t), \quad (10.1)$$

kde $p, q \in \mathbb{R}$, f je reálná T -periodická funkce po částech spojitá a po částech monotónní na intervalu $[0, T]$.

Hledáme partikulární T -periodické řešení rovnice (10.1), které je po částech spojitě a po částech monotónní na intervalu $[0, T]$.

Označme $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Podle 9.3.7 pro všechna $t \in \mathbb{R}$, v nichž je funkce f spojitá, platí

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t),$$

kde

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} f(t) \cos n\omega t dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} f(t) \sin n\omega t dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

Řešení rovnice (10.1) hledáme ve tvaru

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t).$$

Jest

$$x'(t) = \sum_{n=1}^{\infty} n\omega (B_n \cos n\omega t - A_n \sin n\omega t), \quad x''(t) = - \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \omega^2 (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t).$$

Dosažením do rovnice (10.1) dostaneme

$$\begin{aligned} \frac{qA_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (((q - n^2\omega^2)A_n + pn\omega B_n) \cos n\omega t + ((q - n^2\omega^2)B_n - pn\omega A_n) \sin n\omega t) = \\ = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t). \end{aligned}$$

Z nezávislosti (ortogonality) funkcí $1, \cos \omega t, \sin \omega t, \cos 2\omega t, \sin 2\omega t, \dots, \cos n\omega t, \sin n\omega t, \dots$ plyne

$$\begin{aligned} \frac{qA_0}{2} &= \frac{a_0}{2}, \\ (q - n^2\omega^2)A_n + pn\omega B_n &= a_n, \\ -pn\omega A_n + (q - n^2\omega^2)B_n &= b_n. \end{aligned} \tag{10.2}$$

Pokud $q \neq 0$, dostaneme z první rovnice $A_0 = \frac{a_0}{q}$.

Determinant soustavy lineárních algebraických rovnic (10.2) je

$$\begin{vmatrix} (q - n^2\omega^2) & pn\omega \\ -pn\omega & (q - n^2\omega^2) \end{vmatrix} = (q - n^2\omega^2)^2 + p^2n^2\omega^2.$$

Nechť nejprve komplexní číslo $in\omega$ není kořenem charakteristické rovnice diferenciální rovnice (10.1) pro každé $n \in \mathbb{N}$, tedy

$$\begin{aligned} (in\omega)^2 + ipn\omega + q &\neq 0, \\ (q - n^2\omega^2) + ipn\omega &\neq 0, \\ (q - n^2\omega^2)^2 + p^2n^2\omega^2 &\neq 0. \end{aligned}$$

V tomto případě má systém (10.2) jediné řešení. Je-li navíc $q \neq 0$, má diferenciální rovnice (10.1) T -periodické, po částech spojitě a po částech monotónní řešení, které je Fourierovou řadou určeno jednoznačně až na izolovanou množinu bodů nespojitosti. Je-li $q = 0$, $a_0 = 0$, má rovnice (10.1) nekonečně mnoho T -periodických řešení, které se od sebe liší o aditivní konstantu.

Jestliže pro nějaké $n_0 \in \mathbb{N}$ je komplexní číslo $in\omega$ kořenem charakteristické rovnice diferenciální rovnice (10.1) a $a_{n_0}^2 + b_{n_0}^2 \neq 0$, nemá systém (10.2) řešení. To znamená, že rovnice (10.1) nemá po částech spojitě a po částech monotónní T -periodické řešení. V tomto případě mluvíme o *resonanci*.

Jestliže pro nějaké $n_0 \in \mathbb{N}$ je komplexní číslo $in\omega$ kořenem charakteristické rovnice diferenciální rovnice (10.1), $a_{n_0}^2 + b_{n_0}^2 = 0$ a současně $q \neq 0$ nebo $a_0 = 0$, má rovnice (10.1) nekonečně mnoho T -periodických řešení.

Příklad:

$$x'' - x = |\sin t|$$

Funkce $f(t) = |\sin t|$ je π -periodická, spojitá a sudá. Je tedy $\omega = 2$ a

$$|\sin t| = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2nt,$$

přičemž

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin t \cos 2nt dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (\sin(1+2n)t + \sin(1-2n)t) dt = \\ &= -\frac{1}{\pi} \left[\frac{\cos(1+2n)t}{1+2n} + \frac{\cos(1-2n)t}{1-2n} \right]_0^{\pi} = -\frac{1}{\pi} \left(\frac{(-1)^{1+2n}}{1+2n} + \frac{(-1)^{1-2n}}{1-2n} - \frac{1}{1+2n} - \frac{1}{1-2n} \right) = \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{1+2n} + \frac{1}{1-2n} \right) = \frac{4}{\pi(1-4n^2)}. \end{aligned}$$

Je tedy

$$|\sin t| = \frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nt}{4n^2 - 1}.$$

Partikulární π -periodické řešení je

$$-\frac{2}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos 2nt + B_n \sin 2nt),$$

přičemž

$$(-1 - 4n^2)A_n = -\frac{4}{\pi(4n^2 - 1)}, \quad (-1 - 4n^2)B_n = 0.$$

Odtud $A_n = \frac{4}{\pi(16n^4 - 1)}$, $B_n = 0$ a tedy π -periodické řešení je

$$-\frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nt}{16n^4 - 1}.$$

Obecné řešení přidružené homogenní rovnice je $Ae^t + Be^{-t}$, takže obecné řešení dané rovnice je

$$x(t) = Ae^t + Be^{-t} - \frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nt}{16n^4 - 1}.$$

Část IV

Diferenciální počet funkcí n proměnných

Kapitola 11

Metrické prostory

11.1 Pojem metriky

11.1.1 Definice

Bud' $P \neq \emptyset$ množina a $\rho : P^2 \rightarrow [0, \infty)$ zobrazení, které pro všechna $x, y, z \in P$ splňuje

- (M1) $\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ (axiom totožnosti)
- (M2) $\rho(x, y) = \rho(y, x)$ (axiom symetrie)
- (M3) $\rho(x, y) + \rho(y, z) \geq \rho(x, z)$ (trojúhelníková nerovnost)

Zobrazení ρ nazýváme *metrika na P* , prvky množiny P nazýváme *body metrického prostoru (P, ρ)* , číslo $\rho(x, y)$ nazýváme *vzdálenost bodů x, y* .

11.1.2 Příklady

1. Diskrétní metrický prostor

$$P \neq \emptyset \text{ libovolná množina, } \rho(x, y) = \begin{cases} 1, & x \neq y \\ 0, & x = y \end{cases}.$$

2. Metrika na \mathbb{R}

$$P = \mathbb{R}, \rho(x, y) = |x - y|.$$

3. Metriky na \mathbb{R}^n

$$P = \mathbb{R}^n, x = (x_1, x_2, \dots, x_n), y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$$

$$\rho_2(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{euklidovská metrika}$$

$$\rho_1(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad \text{součtová metrika (taxikářská metrika)}$$

$$\rho_\infty(x, y) = \max\{|x_i - y_i| : i = 1, 2, \dots, n\} \quad \text{maximální metrika}$$

Axiomy (M1), (M2) jsou splněny triviálně. (M3) ověříme postupně:

$$\rho_1: \rho_1(x, y) + \rho_1(y, z) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| + \sum_{i=1}^n |y_i - z_i| = \sum_{i=1}^n (|x_i - y_i| + |y_i - z_i|) \geq \sum_{i=1}^n |x_i - z_i| = \rho_1(x, z)$$

$$\rho_\infty: \rho_\infty(x, y) + \rho_\infty(y, z) = \max\{|x_i - y_i| : i = 1, 2, \dots, n\} + \max\{|y_i - z_i| : i = 1, 2, \dots, n\} \geq \max\{|x_i - y_i| + |y_i - z_i| : i = 1, 2, \dots, n\} \geq \max\{|x_i - z_i| : i = 1, 2, \dots, n\} \text{ pro libovolné } i \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \text{ a tedy } \rho_\infty(x, y) + \rho_\infty(y, z) \geq \max\{|x_i - z_i| : i = 1, 2, \dots, n\} = \rho_\infty(x, z)$$

$$\rho_2: \text{Vyjdeme z nerovnosti } \sum_{i=1}^n u_i v_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2} \text{ (Cauchy-Buňakovski-Schwarz)}$$

$$u_i = p_i + q_i, v_i = q_i : \sum_{i=1}^n (p_i + q_i) q_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2}$$

$$u_i = p_i, v_i = p_i + q_i : \quad \sum_{i=1}^n p_i(p_i + q_i) \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)^2}$$

$$\text{Sečtením: } \sum_{i=1}^n (p_i + q_i)^2 \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)^2} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2} \right)$$

$$\text{neboli } \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i + q_i)^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2} \quad (\text{Minkowského nerovnost})$$

Píšeme-li v poslední nerovnosti $x_i - y_i$ místo p_i a $y_i - z_i$ místo q_i , dostaneme

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - z_i)^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2}, \text{ tedy}$$

$$\rho_2(x, z) \leq \rho_2(x, y) + \rho_2(y, z).$$

4. Buď $P = C[a, b]$ — množina funkcí spojitých na intervalu $[a, b]$

$$\rho_C(f, g) = \max\{|f(x) - g(x)| : x \in [a, b]\} \quad \text{metrika stejnoměrné konvergence}$$

$$\rho_I(f, g) = \int_a^b |f(x) - g(x)| dx \quad \text{integrální metrika}$$

2.2.12 ukazuje, že ρ_C je definována korektně. (M1) a (M2) jsou opět splněny triviálně.

Platnost (M3) pro ρ_C ověříme podobně jako v případě ρ_∞ na \mathbb{R}^n .

Platnost (M3) pro ρ_I ověříme s využitím **5.2.6** a **5.2.3**:

$$\begin{aligned} \rho_I(f, h) &= \int_a^b |f(x) - h(x)| dx = \int_a^b |f(x) - g(x) + g(x) - h(x)| dx \leq \\ &\leq \int_a^b (|f(x) - g(x)| + |g(x) - h(x)|) dx = \int_a^b |f(x) - g(x)| dx + \int_a^b |g(x) - h(x)| dx = \\ &= \rho_I(f, g) + \rho_I(g, h). \end{aligned}$$

5. Buď $P = \ell_\infty$ — množina ohraničených posloupností

$$\rho_\infty(\{a_n\}, \{b_n\}) = \sup\{|a_n - b_n| : n \in \mathbb{N}\}$$

Platnost (M1), (M2) a (M3) ověříme stejně, jako v případě ρ_∞ na \mathbb{R}^n .

11.1.3 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor. Pro $a \in P$, $r \in \mathbb{R}$, $r > 0$ definujeme:

$$K[a, r] = \{x \in P : \rho(x, a) \leq r\} \quad \text{— uzavřená koule se středem } a \text{ a poloměrem } r,$$

$$K(a, r) = \{x \in P : \rho(x, a) < r\} \quad \text{— otevřená koule se středem } a \text{ a poloměrem } r,$$

Speciálně: otevřená koule $\mathcal{O}_\varepsilon(a) = \mathcal{O}(a) = K(a, \varepsilon)$ se nazývá (*epsilon*ové) *okolí bodu* a .

$$\text{Zřejmě platí: } \varepsilon \leq \delta \Rightarrow \mathcal{O}_\varepsilon(a) \subseteq \mathcal{O}_\delta(a).$$

11.1.4 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor. Pro $\emptyset \neq A, B \subseteq P$ definujeme:

$$\rho(A, B) = \inf\{\rho(a, b) : a \in A, b \in B\} \quad \text{— vzdálenost množin } A, B,$$

$$d(A) = \sup\{\rho(x, y) : x \in A, y \in A\} \quad \text{— průměr množiny } A.$$

Jestliže množina $\{x \in A, y \in A\}$ není ohraničená shora, klademe $d(A) = \infty$

Vzdálenost bodu x od množiny A definujeme: $\rho(x, A) = \rho(\{x\}, A)$.

11.1.5 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Řekneme, že množina A je *ohraničená*, jestliže $d(A) < \infty$.

Množina A je zřejmě ohraničená, jestliže existuje bod a a číslo $r > 0$, že $A \subseteq K(a, r)$.

11.1.6 Poznámka

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Pro $x, y \in A$ definujeme $\rho_A(x, y) = \rho(x, y)$. Zobrazení ρ_A je zřejmě metrika na A .

11.1.7 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Metriku ρ_A zavedenou v 11.1.6 nazýváme *metrikou indukovanou na množině A metrikou ρ* . Metrický prostor (A, ρ_A) nazýváme *podprostorem metrického prostoru (P, ρ)* . Píšeme $(A, \rho_A) \subseteq (P, \rho)$.

11.1.8 Věta

Buďte $(P_1, \sigma_1), (P_2, \sigma_2)$ metrické prostory. Položme $P = P_1 \times P_2$ a definujme zobrazení $\rho : P^2 \rightarrow [0, \infty)$ předpisem

$$\rho((x_1, x_2), (y_1, y_2)) = \sqrt{(\sigma_1(x_1, y_1))^2 + (\sigma_2(x_2, y_2))^2}.$$

Pak ρ je metrika na P .

D.: Nejdříve dokážeme pomocné tvrzení: Necht (R, σ) je metrický prostor a $a, b, c \in R$. Pak existují $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}^2$ takové body, že

$$\sigma(a, b) = \rho_2(\alpha, \beta), \quad \sigma(b, c) = \rho_2(\beta, \gamma), \quad \sigma(a, c) = \rho_2(\alpha, \gamma),$$

kde ρ_2 je euklidovská metrika na \mathbb{R}^2 .

Pro stručnost označme $r = \sigma(a, b)$, $s = \sigma(a, c)$, $t = \sigma(b, c)$. Nyní stačí volit

$$\alpha = (0, 0), \quad \beta = (r, 0), \quad \gamma = \left(\frac{r^2 + s^2 - t^2}{2r}, \frac{\sqrt{(2rs - r^2 - s^2 + t^2)(2rs + r^2 + s^2 - t^2)}}{2r} \right).$$

(Jedná se o konstrukci trojúhelníka v rovině, známe-li délky stran.)

Necht $(x_1, x_2), (y_1, y_2), (z_1, z_2) \in P$.

- Pro $(x_1, x_2), (y_1, y_2)$ je $\rho((x_1, x_2), (y_1, y_2)) = 0$ právě tehdy, když $\sigma_1(x_1, y_1) = 0$ a $\sigma_2(x_2, y_2) = 0$, což podle (M1) nastane právě tehdy, když $x_1 = y_1$ a $x_2 = y_2$, tedy $(x_1, x_2) = (y_1, y_2)$. ρ splňuje (M1).
- $\rho((x_1, x_2), (y_1, y_2)) = \sqrt{(\sigma_1(x_1, y_1))^2 + (\sigma_2(x_2, y_2))^2} = \sqrt{(\sigma_1(y_1, x_1))^2 + (\sigma_2(y_2, x_2))^2} = \rho((y_1, y_2), (x_1, x_2))$, takže ρ splňuje (M2).
- Podle pomocného tvrzení existují reálná čísla $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ taková, že

$$\begin{aligned} \sigma_1(x_1, y_1) &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\xi_i - \eta_i)^2}, & \sigma_1(x_1, z_1) &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\xi_i - \zeta_i)^2}, & \sigma_1(y_1, z_1) &= \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\eta_i - \zeta_i)^2}, \\ \sigma_2(x_2, y_2) &= \sqrt{\sum_{i=3}^4 (\xi_i - \eta_i)^2}, & \sigma_2(x_2, z_2) &= \sqrt{\sum_{i=3}^4 (\xi_i - \zeta_i)^2}, & \sigma_2(y_2, z_2) &= \sqrt{\sum_{i=3}^4 (\eta_i - \zeta_i)^2}. \end{aligned}$$

Pak

$$\begin{aligned} \rho((x_1, x_2), (y_1, y_2)) &= \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\xi_i - \eta_i)^2} = \rho_2((\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4), (\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4)), \\ \rho((y_1, y_2), (z_1, z_2)) &= \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\eta_i - \zeta_i)^2} = \rho_2((\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4), (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4)), \\ \rho((x_1, x_2), (z_1, z_2)) &= \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\xi_i - \zeta_i)^2} = \rho_2((\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4), (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4)), \end{aligned}$$

kde ρ_2 je euklidovská metrika na \mathbb{R}^4 . Poněvadž ρ_2 splňuje nerovnost (M3), splňuje ji také ρ .

□

11.1.9 Definice

Budte (P_1, σ_1) , (P_2, σ_2) metrické prostory, $P = P_1 \times P_2$ a ρ metrika definovaná v 11.1.8. Prostor (P, ρ) nazýváme (*kartézským součinem prostorů* (P_1, σ_1) a (P_2, σ_2)).

11.1.10 Definice

Budte (P_1, ρ_1) , (P_2, ρ_2) metrické prostory. Zobrazení $f : P_1 \rightarrow P_2$ se nazývá *isometrické (izometrie)*, jestliže $\rho_2(f(x), f(y)) = \rho_1(x, y)$ pro všechny dvojice bodů $(x, y) \in P_1$. Jestliže existuje izometrie $f : P_1 \rightarrow P_2$, řekneme, že prostory (P_1, ρ_1) , (P_2, ρ_2) jsou *isometrické*.

Například všechna shodná zobrazení známá z geometrie jsou izometriemi.

11.1.11 Poznámka

Isometrické zobrazení je prosté.

D.: Kdyby existovaly body $x, y \in P_1$ takové, že $f(x) = f(y)$, pak by podle (M1) platilo $0 = \rho_2(f(x), f(y)) = \rho_1(x, y) \neq 0$, což by byl spor. \square

Tedy metrický prostor a jeho isometrický obraz lze považovat za dvě kopie téhož prostoru.

11.2 Podmnožiny metrického prostoru

11.2.1 Definice

Bud' (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Bod $a \in P$ se nazývá

- *vnitřní bod množiny* A , jestliže existuje $\varepsilon > 0$ takové, že $\mathcal{O}_\varepsilon(a) \subseteq A$,
- *vnější bod množiny* A , jestliže existuje $\varepsilon > 0$ takové, že $\mathcal{O}_\varepsilon(a) \cap A = \emptyset$,
- *hraniční bod množiny* A , jestliže pro každé $\varepsilon > 0$ platí $\mathcal{O}_\varepsilon(a) \cap A \neq \emptyset$, $\mathcal{O}_\varepsilon(a) \cap (P \setminus A) \neq \emptyset$,
- *bod uzávěru množiny* A , jestliže $\rho(a, A) = 0$,
- *hromadný bod množiny* A , jestliže pro každé $\varepsilon > 0$ platí $(\mathcal{O}_\varepsilon(a) \cap A) \setminus \{a\} \neq \emptyset$,
- *izolovaný bod množiny* A , jestliže existuje $\varepsilon > 0$ takové, že $\mathcal{O}_\varepsilon(a) \cap A = \{a\}$.

Množina všech vnitřních bodů množiny A se nazývá *vnitřek množiny* A a značí se A° (někdy $\text{int } A$), Množina všech hraničních bodů množiny A se nazývá *hranice množiny* A a značí se ∂A (někdy $\text{fr } A$), Množina všech bodů uzávěru množiny A se nazývá *uzávěr množiny* A a značí se \bar{A} (někdy $\text{cl } A$), Množina všech hromadných bodů množiny A se nazývá *derivace množiny* A a značí se A' .

Příklad $P = \mathbb{R}$, $\rho(x, y) = |x - y|$

a) $A = (0, 1)$: $A^\circ = (0, 1)$, $\partial A = \{0, 1\}$, $\bar{A} = [0, 1]$, $A' = [0, 1]$

b) $A = [0, 1] \cap \mathbb{Q}$: $A^\circ = \emptyset$, $\partial A = [0, 1]$, $\bar{A} = [0, 1]$, $A' = [0, 1]$

b) $A = [0, 1] \cup \{2\}$: $A^\circ = (0, 1)$, $\partial A = \{0, 1, 2\}$, $\bar{A} = [0, 1] \cup \{2\}$, $A' = [0, 1]$

11.2.2 Věta

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A, B \subseteq P$. Pak platí

1. $\overline{\emptyset} = \emptyset, \emptyset^\circ = \emptyset$.
2. $\overline{P} = P, P^\circ = P$.
3. $A^\circ \subseteq A \subseteq \overline{A}$.
4. $A \subseteq B \Rightarrow \overline{A} \subseteq \overline{B}, A^\circ \subseteq B^\circ$.
5. $\overline{A \cup B} = \overline{A \cup B}, A^\circ \cap B^\circ = (A \cap B)^\circ$.
6. $\overline{A} = P \setminus (P \setminus A)^\circ, A^\circ = P \setminus \overline{P \setminus A}$.
7. $\overline{\overline{A}} = \overline{A}, (A^\circ)^\circ = A^\circ$.

D.: 1. – 4. je triviální

6. $x \in P \setminus (P \setminus A)^\circ \Leftrightarrow x \notin (P \setminus A)^\circ \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\emptyset \neq \mathcal{O}_\varepsilon(x) \cap (P \setminus (P \setminus A)) = \mathcal{O}_\varepsilon(x) \cap A) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \rho(x, A) = 0 \Leftrightarrow x \in \overline{A}$
 $x \in P \setminus \overline{P \setminus A} \Leftrightarrow x \notin \overline{P \setminus A} \Leftrightarrow \varepsilon := \rho(x, P \setminus A) > 0 \Leftrightarrow (\forall y \in P \setminus A)(\rho(x, y) \geq \varepsilon) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathcal{O}_\varepsilon(x) \cap (P \setminus A) = \emptyset \Leftrightarrow \mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq A \Leftrightarrow x \in A^\circ$
5. $x \in A^\circ \cap B^\circ \Rightarrow x \in A^\circ \wedge x \in B^\circ \Rightarrow (\exists \varepsilon_1)(\mathcal{O}_{\varepsilon_1}(x) \subseteq A) \wedge (\exists \varepsilon_2)(\mathcal{O}_{\varepsilon_2}(x) \subseteq B) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathcal{O}_{\min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}}(x) \subseteq A \cap B \Rightarrow x \in (A \cap B)^\circ$
 $x \in (A \cap B)^\circ \Rightarrow (\exists \varepsilon > 0)(\mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq A \cap B) \Rightarrow (\exists \varepsilon > 0)(\mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq A \wedge \mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq B) \Rightarrow$
 $\Rightarrow x \in A^\circ \wedge x \in B^\circ \Rightarrow x \in A^\circ \cap B^\circ$

S využitím 6., již dokázané části a de Morganových pravidel dostaneme

$$\begin{aligned} \overline{A \cup B} &= [P \setminus (P \setminus A)^\circ] \cup [P \setminus (P \setminus B)^\circ] = P \setminus [(P \setminus A)^\circ \cap (P \setminus B)^\circ] = P \setminus [(P \setminus A) \cap (P \setminus B)]^\circ = \\ &= P \setminus [P \setminus (A \cup B)]^\circ = \overline{A \cup B} \end{aligned}$$

7. Buď $x \in \overline{\overline{A}}$. Pak $0 = \rho(x, \overline{\overline{A}}) = \inf\{\rho(x, y) : y \in \overline{\overline{A}}\} \geq \inf\{\rho(x, y) : y \in \overline{A}\} \geq \inf\{\rho(x, y) : y \in A\}$, neboť podle 3. je $A \subseteq \overline{A}$ a tedy $\{\rho(x, y) : y \in \overline{A}\} \supseteq \{\rho(x, y) : y \in A\}$. Poněvadž ale $\inf\{\rho(x, y) : y \in A\} = \rho(x, A) \geq 0$, jest $\rho(x, A) = 0$ a tedy $x \in \overline{A}$, t.j. $\overline{\overline{A}} \subseteq \overline{A}$. Opačná inkluze plyne z 3. Druhou část tvrzení dokážeme analogicky. \square

11.2.3 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Množina A se nazývá *otevřená*, jestliže $A = A^\circ$, množina A se nazývá *uzavřená*, jestliže $A = \overline{A}$.

Zejména podle 11.2.2.6 A° je otevřená množina, \overline{A} je uzavřená množina.

11.2.4 Věta

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Množina A je otevřená právě tehdy, když $P \setminus A$ je uzavřená; množina A je uzavřená právě tehdy, když $P \setminus A$ je otevřená.

- D.: Nechť $A = A^\circ$. Podle 11.2.2.6 je $A = P \setminus \overline{P \setminus A}$. Z toho plyne, že $P \setminus A = P \setminus (P \setminus \overline{P \setminus A}) = \overline{P \setminus A}$ a tedy $P \setminus A$ je uzavřená.
 Nechť $P \setminus A = \overline{P \setminus A}$. Pak podle 11.2.2.6 je $A^\circ = P \setminus \overline{P \setminus A} = P \setminus (P \setminus A) = A$.
 Platnost druhého tvrzení ukážeme analogicky. \square

11.2.5 Věta

Buď (P, ρ) metrický prostor a \mathcal{T} soustava všech otevřených množin prostoru (P, ρ) . Pak platí

$$(T1) \quad P \in \mathcal{T}, \quad \emptyset \in \mathcal{T},$$

$$(T2) \quad A \in \mathcal{T}, B \in \mathcal{T} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{T},$$

$$(T3) \quad (\forall \iota \in I)(A_\iota \in \mathcal{T}) \Rightarrow \bigcup_{\iota \in I} A_\iota \in \mathcal{T}.$$

D.: (T1) Plyne z 11.2.2.1 a 11.2.2.2.

(T2) Je-li $x \in A \cap B$, pak $x \in A = A^\circ$, $x \in B = B^\circ$ a tedy existují $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, že $\mathcal{O}_{\varepsilon_1}(x) \subseteq A$, $\mathcal{O}_{\varepsilon_2}(x) \subseteq B$. Položíme-li $\varepsilon = \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$, pak $\mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq A \cap B$, tedy každý $x \in A \cap B$ je vnitřním bodem, což znamená, že $A \cap B$ je otevřená.

(T3) Necht' $x \in \bigcup_{\iota \in I} A_\iota$. Pak existuje $\iota_0 \in I$, že $x \in A_{\iota_0}$. Poněvadž A_{ι_0} je otevřená, existuje $\varepsilon > 0$ takové, že $\mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq A_{\iota_0} \subseteq \bigcup_{\iota \in I} A_\iota$. \square

11.2.6 Věta

Buď (P, ρ) metrický prostor a \mathcal{F} soustava všech uzavřených množin prostoru (P, ρ) . Pak platí

$$(i) \quad P \in \mathcal{F}, \quad \emptyset \in \mathcal{F},$$

$$(ii) \quad A \in \mathcal{F}, B \in \mathcal{F} \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{F},$$

$$(iii) \quad (\forall \iota \in I)(A_\iota \in \mathcal{F}) \Rightarrow \bigcap_{\iota \in I} A_\iota \in \mathcal{F}.$$

D.: Plyne z 11.2.4, 11.2.5 a z de Morganových pravidel. \square

11.2.7 Poznámky

Z 11.2.5 plyne, že průnik libovolného konečného systému otevřených množin je otevřená množina; z 11.2.6 plyne, že sjednocení libovolného konečného systému uzavřených množin je uzavřená množina.

Průnik nekonečného systému otevřených množin nemusí být otevřená množina:

$$A_n = \left(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right), \quad n \in \mathbb{N}. \quad \bigcap_{n=1}^{\infty} A_n = \{0\}, \quad \text{což není otevřená množina v } \mathbb{R} \text{ s metrikou } \rho(x, y) = |x - y|.$$

Sjednocení nekonečného systému uzavřených množin nemusí být uzavřená množina:

$$A_n = \left[-1 + \frac{1}{n}, 1 - \frac{1}{n}\right], \quad n \in \mathbb{N}. \quad \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = (-1, 1).$$

11.2.8 Věta

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Pak $\partial A = \overline{A} \cap \overline{P \setminus A}$.

D.: $x \in \partial A \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\mathcal{O}_\varepsilon(x) \cap A \neq \emptyset \neq \mathcal{O}_\varepsilon(x) \cap (P \setminus A)) \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\rho(x, A) < \varepsilon \wedge \rho(x, P \setminus A) < \varepsilon) \Leftrightarrow \rho(x, A) = 0 \wedge \rho(x, P \setminus A) = 0 \Leftrightarrow x \in \overline{A} \cap \overline{P \setminus A}$. \square

11.2.9 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Množina A se nazývá *hustá v prostoru* (P, ρ) , jestliže $\overline{A} = P$.

11.2.10 Věta

Bud' (P, ρ) metrický prostor, $A \subseteq P$. Množina A je hustá v P právě tehdy, když ke každému $\varepsilon > 0$ a každému $x \in P$ existuje $a \in A$, že $\rho(x, a) < \varepsilon$, t.j. $a \in \mathcal{O}_\varepsilon(x)$. (Neboli když každý bod $x \in P$ je hromadným bodem množiny A .)

D.: „ \Rightarrow “: Necht' $\bar{A} = P$. Vezmeme $\varepsilon > 0$ a $x \in P$ libovolná. S využitím vlastnosti 1.1.6(i2*) dostaneme

$$x \in P = \bar{A} \Rightarrow \rho(x, A) = 0 \Rightarrow \inf\{\rho(x, a) : a \in A\} = 0 \Rightarrow \text{existuje } a \in A, \text{ že } \rho(x, a) < \varepsilon.$$

„ \Leftarrow “: Jestliže existuje $x \in P \setminus \bar{A}$, pak podle 11.2.4 a definice otevřené množiny existuje $\varepsilon > 0$, že $\mathcal{O}_\varepsilon(x) \subseteq P \setminus \bar{A}$, tedy $\rho(x, a) \geq \varepsilon$ pro každé $a \in \bar{A}$. Podle 11.2.2.3 je $A \subseteq \bar{A}$, což znamená, že $\rho(x, a) \geq \varepsilon$ pro každé $a \in A$. \square

11.3 Konvergence

11.3.1 Definice

Bud' (P, ρ) metrický prostor a $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ posloupnost bodů z P (t.j. zobrazení $\mathbb{N} \rightarrow P$). Řekneme, že posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ konverguje k bodu $x \in P$ (je konvergentní v P) a píšeme $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$ (stručně $\lim x_n = x$, $x_n \rightarrow x$), jestliže $\lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_n, x) = 0$.

11.3.2 Příklady

1. (P, ρ) diskrétní (viz 11.1.2.1)

$$x_n \rightarrow x \Leftrightarrow (\exists n_0 \in \mathbb{N})(n \geq n_0 \Rightarrow x_n = x)$$

2. (\mathbb{R}^2, ρ_1) (viz 11.1.2.3)

$$(x_n, y_n) \rightarrow (x, y) \Leftrightarrow x_n \rightarrow x, y_n \rightarrow y \text{ v } \mathbb{R} \text{ s metrikou } \rho(x, y) = |x - y|.$$

D.: $(x_n, y_n) \rightarrow (x, y) \Leftrightarrow 0 = \lim(|x_n - x| + |y_n - y|) = \lim|x_n - x| + \lim|y_n - y|$. Avšak podle 1.3.5.1 $\lim|x_n - x| \geq 0$, $\lim|y_n - y| \geq 0$, takže $\lim|x_n - x| = 0$, $\lim|y_n - y| = 0$. \square

Analogické tvrzení platí pro všechny metrické prostory z 11.1.2.3.

3. $(C[a, b], \rho_C)$ (viz 11.1.2.4)

$$f_n \rightarrow f \text{ v tomto prostoru} \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0)(\forall x \in [a, b])(|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon).$$

(Má-li posloupnost funkcí definovaných na intervalu $[a, b]$ vlastnost uvedenou na pravé straně ekvivalence, řekneme, že posloupnost funkcí $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ stejnoměrně konverguje na intervalu $[a, b]$ k funkci f .)

$$\begin{aligned} \text{D.}: f_n \rightarrow f \text{ v } (C[a, b], \rho_C) &\Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0)(\rho_C(f_n, f) < \varepsilon) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0)(\max\{|f_n(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} < \varepsilon) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \geq n_0)(\forall x \in [a, b])(|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon) \quad \square \end{aligned}$$

11.3.3 Definice

Bud' (P, ρ) metrický prostor a $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ posloupnost bodů z P . Řekneme, že posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ je ohraničená, jestliže množina $\{x_n : n \in \mathbb{N}\}$ je ohraničená ve smyslu definice 11.1.5.

11.3.4 Věta

Bud' (P, ρ) metrický prostor. Pak platí

1. Každá posloupnost $\{x_n\} \subseteq P$ má nejvýše jednu limitu v P .
2. Posloupnost konvergentní v (P, ρ) je ohraničená v (P, ρ) .
3. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x \in P$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_{n_k}\}$ vybranou z $\{x_n\}$ platí $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x$.

D.: 1.3.3, 1.3.4, 1.3.14. \square

11.3.5 Definice

Bud' (P, ρ) metrický prostor a $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost bodů z P . Řekneme, že posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je *cauchyovská*, jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $m, n \geq n_0$ je $\rho(x_m, x_n) < \varepsilon$.

11.3.6 Věta

Bud' (P, ρ) metrický prostor a $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ posloupnost bodů z P . Je-li $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ konvergentní v (P, ρ) , pak je cauchyovská.

D.: Necht' $x_n \rightarrow x$ a bud' $\varepsilon > 0$ libovolné.

K $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\rho(x_n, x) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Pro libovolné $m \geq n_0$ a libovolné $n \geq n_0$ tedy s využitím trojúhelníkové nerovnosti platí $\rho(x_m, x_n) \leq \rho(x_m, x) + \rho(x_n, x) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$. \square

Obrácené tvrzení obecně neplatí: $P = (0, 1)$, $\rho(x, y) = |x - y|$, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} = \{\frac{1}{n}\}_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská, ale není konvergentní; $0 \notin P$.

11.3.7 Věta

Bud' (P, ρ) metrický prostor a $A \subseteq P$. Množina A je uzavřená v (P, ρ) právě tehdy, když pro každou konvergentní posloupnost $\{x_n\} \subseteq A$, $x_n \rightarrow x$ platí $x \in A$.

D.: „ \Rightarrow “ Necht' $A = \bar{A}$, $\{x_n\}$ libovolná konvergentní, $x_n \rightarrow x$. Kdyby $x \notin \bar{A}$, pak by $\varepsilon = \rho(x, A) > 0$ a tedy pro každé x_n by platilo $\rho(x_n, x) > \varepsilon$, což by bylo ve sporu s $x_n \rightarrow x$.

„ \Leftarrow “ Necht' platí podmínka. Bud' $y \in \bar{A}$ libovolný bod. Pak $\rho(y, A) = 0$. Podle 1.1.6(i2*) ke každému $\frac{1}{n} > 0$ existuje $x_n \in A$, že $\rho(x_n, y) < \frac{1}{n}$. To znamená, že pro takto vytvořenou posloupnost $\{x_n\}$ platí $\lim \rho(x_n, y) = 0$, $x_n \rightarrow y$. Z podmínky plyne, že $y \in A$. Tedy $\bar{A} \subseteq A$ a podle 11.2.2.3 $A = \bar{A}$. \square

11.3.8 Definice

Bud' P množina a ρ, σ metriky na P . Řekneme, že ρ a σ jsou *ekvivalentní metriky na P* , jestliže pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq P$ platí: $x_n \rightarrow x$ v (P, ρ) právě tehdy když $x_n \rightarrow x$ v (P, σ) .

11.3.9 Příklady

1. $P = \mathbb{R}^n$. Metriky $\rho_1, \rho_2, \rho_{\infty}$ zavedené v 11.1.2.3 jsou ekvivalentní:

$x_k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \in \mathbb{R}^n$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$.

$\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x$ v $(\mathbb{R}^n, \rho_1) \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists k_0 \in \mathbb{N})(\forall k \geq k_0)(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(|x_i^k - x_i| < \varepsilon)$

$\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x$ v $(\mathbb{R}^n, \rho_2) \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists k_0 \in \mathbb{N})(\forall k \geq k_0)(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(|x_i^k - x_i| < \varepsilon)$

$\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x$ v $(\mathbb{R}^n, \rho_{\infty}) \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists k_0 \in \mathbb{N})(\forall k \geq k_0)(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(|x_i^k - x_i| < \varepsilon)$

2. $P = C[a, b]$. Metriky ρ_I a ρ_C (viz 11.1.2.3) nejsou ekvivalentní:

$$f_n(x) = \begin{cases} 0, & x \in \left[a, \frac{(n+1)a + (n-1)b}{2n} \right] \cup \left[\frac{(n-1)a + (n+1)b}{2n}, b \right] \\ \frac{2nx - (n+1)a - (n-1)b}{b-a}, & x \in \left(\frac{(n+1)a + (n-1)b}{2n}, \frac{a+b}{2} \right) \\ \frac{-2nx + (n-1)a + (n+1)b}{b-a}, & x \in \left(\frac{a+b}{2}, \frac{(n-1)a + (n+1)b}{2n} \right) \end{cases},$$

$f \equiv 0$

$$\rho_I(f_n, f) = \int_a^b f_n(x) dx = \frac{b-a}{2n} \rightarrow 0$$

$$\rho_C(f_n, f) = 1$$

11.3.10 Poznámka

Buďte ρ, σ ekvivalentní metriky na P . Z 11.3.7 plyne, že množina $A \subseteq P$ je uzavřená v (P, ρ) právě tehdy, když je uzavřená v (P, σ) . Z 11.2.4 dále plyne, že množina $A \subseteq P$ je otevřená v (P, ρ) právě tehdy, když je otevřená v (P, σ) .

11.3.11 Věta

Buďte ρ, σ metriky na množině P . Jestliže existují kladné konstanty a, b takové, že pro všechny dvojice bodů $(x, y) \in P^2$ je

$$a\sigma(x, y) \leq \rho(x, y) \leq b\sigma(x, y),$$

pak jsou metriky ρ a σ ekvivalentní.

D.: Nechť je podmínka splněna, $x \in P$, a nechť $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subseteq P$ je taková posloupnost, že $\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma(x_n, x) = 0$. Pak $a\sigma(x_n, x) \leq \rho(x_n, x) \leq b\sigma(x_n, x)$ a z 1.3.7 plyne $\lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_n, x) = 0$.

Důkaz se dokončí analogickou úvahou s využitím nerovnosti $\frac{1}{b}\rho(x, y) \leq \sigma(x, y) \leq \frac{1}{a}\rho(x, y)$, která je ekvivalentní s nerovností v podmínce věty. \square

11.4 Úplné a kompaktní prostory

11.4.1 Definice

Metrický prostor (P, ρ) se nazývá *úplný*, jestliže v něm má každá cauchyovská posloupnost limitu.

11.4.2 Příklady

1. Prostor \mathbb{R} s metrikou $\rho(x, y) = |x - y|$ je podle 1.3.22 úplný.
2. Prostory (\mathbb{R}^n, ρ_1) , (\mathbb{R}^n, ρ_2) , $(\mathbb{R}^n, \rho_\infty)$ (viz 11.1.2) jsou úplné:
Je-li posloupnost $\{x^k\}_{k=1}^\infty = \{(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)\}_{k=1}^\infty$ cauchyovská v prostoru (\mathbb{R}^n, ρ_1) , pak je zřejmě každá z posloupností $\{x_1^k\}_{k=1}^\infty, \{x_2^k\}_{k=1}^\infty, \dots, \{x_n^k\}_{k=1}^\infty$ cauchyovská v prostoru (\mathbb{R}, ρ_1) . Pak podle 1.3.22 každá tato posloupnost je konvergentní v (\mathbb{R}, ρ_1) , $\lim_{k \rightarrow \infty} x_1^k = x_1, \lim_{k \rightarrow \infty} x_2^k = x_2, \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} x_n^k = x_n$. Odtud vyplyne, že i posloupnost $\{x^k\}_{k=1}^\infty$ je konvergentní v prostoru (\mathbb{R}^n, ρ_1) , $\lim_{k \rightarrow \infty} x^k = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$.
Podle 11.3.9.1 jsou metriky $\rho_1, \rho_2, \rho_\infty$ ekvivalentní.
3. Diskrétní metrický prostor (P, ρ) (viz 11.1.2.1) je úplný.
Buď $\varepsilon = \frac{1}{2}$. $\rho(x_n, x_m) < \frac{1}{2}$ právě tehdy, když $x_n = x_m$. Tedy je-li $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ cauchyovská, pak je od jistého indexu počínaje stacionární a to podle 11.3.2.1 znamená, že je konvergentní.
4. \mathbb{Q} s metrikou indukovanou ρ_1 není úplný:
Např. $\{(1 + \frac{1}{n})^n\}_{n=1}^\infty$ konverguje v (\mathbb{R}, ρ_1) k $e \notin \mathbb{Q}$.
5. Prostor $(C[a, b], \rho_I)$ (viz 11.1.2.4) není úplný:

$$[a, b] = [-1, 1]$$

$$f_n(x) = \begin{cases} -1, & x \in [-1, \frac{1}{n}) \\ nx, & x \in [-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}] \\ 1, & x \in (\frac{1}{n}, 1] \end{cases},$$

$$\rho_I(f_n, f_{n+p}) = \frac{p}{n^2 + np},$$

$\lim_{n \rightarrow \infty} \rho_I(f_n, f_{n+p}) = 0$, tedy $\{f_n\}$ je cauchyovská. Avšak jediná možná limita posloupnosti funkcí $\{f_n\}$ je

funkce $f(x) = \begin{cases} -1, & x \in [-1, 0) \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x \in (0, 1] \end{cases}$, což není spojitá funkce, $f \notin C[-1, 1]$ a tedy $\{f_n\}$ není v $(C[-1, 1], \rho_I)$

konvergentní.

6. Prostor $(C[a, b], \rho_C)$ (viz 11.1.2.4) je úplný:

Buď $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ libovolná posloupnost funkcí cauchyovská v $(C[a, b], \rho_C)$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné číslo. K němu existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n, m \geq n_0$ je $\rho_C(f_n, f_m) < \varepsilon$.

Buď $x_0 \in [a, b]$ libovolný bod. Pak pro $n, m \geq n_0$ je

$$|f_n(x_0) - f_m(x_0)| \leq \max\{|f_n(x) - f_m(x)| : x \in [a, b]\} = \rho_C(f_n, f_m) < \varepsilon,$$

což znamená, že číselná posloupnost $\{f_n(x_0)\}_{n=1}^\infty$ je cauchyovská a tedy podle 1.3.22 konvergentní.

Poněvadž $x_0 \in [a, b]$ byl libovolný bod, existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ pro každé $x \in [a, b]$.

Definujme funkci $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ předpisem: $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$.

Ukážeme, že $\sup\{|f_n(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} \rightarrow 0$:

Poněvadž $\{f_n\}$ je cauchyovská, tak k $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n, m \geq n_1$ je

$$\rho_C(f_n, f_m) < \frac{\varepsilon}{2}. \text{ Pro každé } x \in [a, b] \text{ a všechna } n, m \geq n_1 \text{ je tedy } |f_n(x) - f_m(x)| < \frac{\varepsilon}{2}, \text{ což podle 1.3.5.1}$$

znamená, že pro každé $x \in [a, b]$ a každé $n \geq n_1$ je $\lim_{m \rightarrow \infty} |f_n(x) - f_m(x)| \leq \frac{\varepsilon}{2}$. Tedy pro $n \geq n_1$ a každé

$x \in [a, b]$ je $|f_n(x) - f(x)| = \lim_{m \rightarrow \infty} |f_n(x) - f_m(x)| \leq \frac{\varepsilon}{2}$, takže pro $n \geq n_1$ je

$$\sup\{|f_n(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon.$$

Zbývá ukázat, že funkce f je spojitá.

Podle předchozího tvrzení k $\frac{\varepsilon}{3} > 0$ existuje $n_2 \in \mathbb{N}$, že $\sup\{|f_{n_2}(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} < \frac{\varepsilon}{3}$.

Buď $x_1 \in [a, b]$ libovolný bod. Poněvadž funkce f_{n_2} je spojitá, k číslu $\frac{\varepsilon}{3} > 0$ existuje $\delta > 0$, že pro všechna

$x \in [a, b]$ taková, že $|x_1 - x| < \delta$ je $|f_{n_2}(x_1) - f_{n_2}(x)| < \frac{\varepsilon}{3}$. Pro $x \in [a, b]$ takové, že $|x_1 - x| < \delta$ tedy platí

$$|f(x_1) - f(x)| = |f(x_1) - f_{n_2}(x_1) + f_{n_2}(x_1) - f_{n_2}(x) + f_{n_2}(x) - f(x)| \leq$$

$$\leq |f(x_1) - f_{n_2}(x_1)| + |f_{n_2}(x_1) - f_{n_2}(x)| + |f_{n_2}(x) - f(x)| \leq$$

$$\leq \sup\{|f_{n_2}(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} + |f_{n_2}(x_1) - f_{n_2}(x)| + \sup\{|f_{n_2}(x) - f(x)| : x \in [a, b]\} <$$

$< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon$, což znamená, že funkce f je spojitá v bodě $x_1 \in [a, b]$. Poněvadž tento bod byl libovolný, je f spojitá na $[a, b]$.

11.4.3 Věta

Je-li metrický prostor (P, ρ) úplný a množina $A \subseteq P$ je uzavřená, pak metrický prostor (A, ρ_A) , kde ρ_A je metrika indukovaná metrikou ρ , je úplný.

D.: Buď $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ libovolná cauchyovská posloupnost. Poněvadž (P, ρ) je úplný, existuje $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x \in P$.

Podle 11.3.7 je $x \in A$. \square

11.4.4 Definice

Buď (P, ρ) metrický prostor. Řekneme, že metrický prostor (Q, σ) je *úplným obalem* metrického prostoru (P, ρ) , jestliže

(i) (Q, σ) je úplný prostor,

(ii) $(P, \rho) \subseteq (Q, \sigma)$,

(iii) Množina P je hustá v (Q, σ) .

Například (\mathbb{R}, ρ_1) je úplným obalem (\mathbb{Q}, ρ_1) .

11.4.5 Věta

Ke každému metrickému prostoru (P, ρ) existuje jeho úplný obal. Tento úplný obal je určen jednoznačně v tomto smyslu: Jsou-li (Q_1, σ_1) a (Q_2, σ_2) dva úplné obaly prostoru (P, ρ) , pak (Q_1, σ_1) a (Q_2, σ_2) jsou isometrické.

Kroky důkazu:

1. Na množině všech cauchyovských posloupností z prostoru (P, ρ) definujeme relaci \sim vztahem:
 $\{x_n\} \sim \{y_n\} \Leftrightarrow \rho(x_n, y_n) \rightarrow 0$.
2. Ukážeme, že \sim je ekvivalence.
3. Položíme $Q = P / \sim$ (rozklad množiny P podle ekvivalence \sim). Prvky množiny Q jsou třídy ekvivalence \sim . Označíme $[\{x_n\}] \in Q$ takovou třídu ekvivalence, že $\{x_n\} \in [\{x_n\}]$.
4. Položíme $\sigma([\{x_n\}], [\{y_n\}]) = \lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_n, y_n)$. Ukážeme, že σ nezáleží na výběru reprezentantů a že σ je metrikou na Q .
5. Ztotožníme $[\{x, x, \dots\}] \in Q$ s $x \in P$. Pak je $(P, \rho) \subseteq (Q, \sigma)$.
6. Ukážeme, že prostor (Q, σ) je úplný.
7. Ukážeme, že $\bar{P} = Q$.
8. Ukážeme, že je-li (Q_1, σ_1) úplným obalem prostoru (P, ρ) , pak (Q, σ) a (Q_1, σ_1) jsou isometrické. \square

11.4.6 Definice

Řekneme, že metrický prostor (P, ρ) je *kompaktní*, jestliže z každé posloupnosti jeho bodů lze vybrat posloupnost konvergentní.

Řekneme, že množina $A \subseteq P$ je kompaktní, jestliže podprostor (A, ρ_A) je kompaktní.

11.4.7 Věta

Je-li A kompaktní množina v metrickém prostoru (P, ρ) , pak je A uzavřená a ohraničená.

D.: Pripusťme, že $A \neq \bar{A}$, tedy že existuje $x \in \bar{A} \setminus A$. Pak $\rho(x, A) = 0$ a podle definice infima existuje $\{x_n\} \subseteq A$, že $\rho(x_n, x) \rightarrow 0$, neboli $x_n \rightarrow x$. Pro každou vybranou posloupnost $\{x_{n_k}\}$ z posloupnosti $\{x_n\}$ je podle 11.3.4.3 $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x \notin A$, což je spor s kompaktností A .

Připusťme, že A není ohraničená. Buď $x_1 \in A$ libovolný bod. Existuje $x_2 \in A \setminus K(x_1, 1)$. (Kdyby neexistoval, byla by množina A ohraničená.) Dále existuje $x_3 \in A \setminus K(x_1, \rho(x_1, x_2) + 1)$ atd. Posloupnost $\{x_n\}$ i každá posloupnost z ní vybraná není cauchyovská, neboť $\rho(x_n, x_m) \geq 1$ a tedy podle 11.3.6 nemůže být konvergentní. \square

11.4.8 Věta

Množina $A \subseteq \mathbb{R}^n$ je kompaktní v (\mathbb{R}^n, ρ_1) právě tehdy, když je v tomto prostoru uzavřená a ohraničená.

D.: Nutnost podmínky plyne z 11.4.7. Dokážeme její dostatečnost.

Buď $\{x^k\}_{k=1}^\infty = \{(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)\}_{k=1}^\infty$ posloupnost bodů z A . Poněvadž A je ohraničená, je každá z číselných posloupností $\{x_i^k\}_{k=1}^\infty$, $i = 1, 2, \dots, n$ ohraničená. Podle 1.3.19.1 lze z každé $\{x_i^k\}_{k=1}^\infty$ vybrat posloupnost $\{x_i^{k_l}\}_{l=1}^\infty$ konvergentní. Vybereme tedy z posloupnosti $\{x_1^k\}_{k=1}^\infty$ konvergentní posloupnost $\{x_1^{k_1}\}_{k_1=1}^\infty$ a označíme $x_1^0 = \lim_{k_1 \rightarrow \infty} x_1^{k_1}$. Potom z posloupnosti $\{x_2^{k_1}\}_{k_1=1}^\infty$ vybereme konvergentní posloupnost $\{x_2^{k_2}\}_{k_2=1}^\infty$ a označíme $x_2^0 = \lim_{k_2 \rightarrow \infty} x_2^{k_2}$. Tak postupujeme dále, až z posloupnosti $\{x_n^{k_{n-1}}\}_{k_{n-1}=1}^\infty$ vybereme konvergentní posloupnost $\{x_n^{k_n}\}_{k_n=1}^\infty$, kterou budeme pro přehlednost značit $\{x_n^l\}_{l=1}^\infty$, a označíme $x_n^0 = \lim_{l \rightarrow \infty} x_n^l$. Tímto postupem získáme posloupnost $\{(x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l)\}_{l=1}^\infty$, která je vybraná z posloupnosti $\{(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)\}_{k=1}^\infty$ a platí $\lim_{l \rightarrow \infty} (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l) = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = x^0$. Poněvadž A je uzavřená, je podle 11.3.7 $x^0 \in A$. \square

Z ekvivalence metrik $\rho_1, \rho_2, \rho_\infty$ (viz 11.3.9.1) plyne, že analogické tvrzení platí i pro (\mathbb{R}^n, ρ_2) a $(\mathbb{R}^n, \rho_\infty)$.

11.4.9 Věta

Je-li metrický prostor (P, ρ) kompaktní, pak je úplný.

D.: Buď $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ libovolná cauchyovská posloupnost v prostoru (P, ρ) . Poněvadž (P, ρ) je kompaktní, existuje posloupnost $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ vybraná z posloupnosti $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ taková, že $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x \in P$.

Ukážeme, že $x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.

Buď $\varepsilon > 0$ libovolné číslo.

Poněvadž $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ konverguje k x , tak k $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $k_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $k \geq k_0$ je $\rho(x_{n_k}, x) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Poněvadž $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ je cauchyovská, tak k $\frac{\varepsilon}{2} > 0$ existuje $n_1 \in \mathbb{N}$ takové, že pro $n \geq n_1$ a $m \geq n_1$ platí $\rho(x_n, x_m) < \frac{\varepsilon}{2}$.

Položme $n_0 = \max\{n_1, n_{k_0}\}$ a necht' $n \geq n_0$ a $k > k_0$ jsou libovolná čísla. Pak také $n_k > n_0$. S využitím trojúhelníkové nerovnosti dostaneme

$$\rho(x_n, x) \leq \rho(x_n, x_{n_k}) + \rho(x_{n_k}, x) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon,$$

což znamená, že $x = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$. \square

11.5 Zobrazení metrických prostorů

11.5.1 Definice

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$.

Řekneme, že zobrazení F je *spojité v bodě* $x_0 \in P$, jestliže ke každému okolí V bodu $F(x_0)$ v (Q, σ) existuje okolí U bodu x_0 v (P, ρ) tak, že $F(U) \subseteq V$.

Řekneme, že zobrazení F je *spojité na* P , jestliže je spojité v každém bodě $x \in P$.

Zobrazení F je spojité v bodě x_0 , jestliže $(\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x \in P)(\rho(x, x_0) < \delta \Rightarrow \sigma(F(x), F(x_0)) < \varepsilon)$.

11.5.2 Věta

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory. Zobrazení $F : P \rightarrow Q$ je spojité na P právě tehdy, když ke každé otevřené množině $V \subseteq F(P)$ existuje otevřená množina $U \subseteq P$ taková, že $F(U) \subseteq V$.

D.: \Rightarrow : Necht' F je spojité, $V \subseteq F(P)$ otevřená. Ke každému $y_0 \in V$ existuje $x_0 \in P$ takové, že $F(x_0) = y_0$. Poněvadž V je otevřená, k libovolnému $y_0 \in V$ existuje $\varepsilon_{y_0} > 0$ takové, že $\mathcal{O}_{\varepsilon_{y_0}}(y_0) \subseteq V$. K ε_{y_0} existuje $\delta_{y_0} > 0$ takové, že $F(\mathcal{O}_{\delta_{y_0}}(x_0)) \subseteq \mathcal{O}_{\varepsilon_{y_0}}(y_0)$. Množina $U = \bigcup_{y_0 \in V} \mathcal{O}_{\delta_{y_0}}(x_0)$ je podle 11.2.5(T3) otevřená a zřejmě platí $F(U) = V$.

\Leftarrow : Buď $x_0 \in P$ libovolný bod, V okolí bodu $F(x_0)$. Existuje otevřená $U \subseteq P$ taková, že $F(U) \subseteq V$. Poněvadž U je otevřená, existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ bodu x_0 takové, že $\mathcal{O}(x_0) \subseteq U$. Pak $F(\mathcal{O}(x_0)) \subseteq F(U) \subseteq V$ a tedy F je spojité v bodě x_0 . \square

11.5.3 Věta (Heineova podmínka)

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory. Zobrazení $F : P \rightarrow Q$ je spojité v bodě $x_0 \in P$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ bodů z P takovou, že $x_n \rightarrow x_0$ v (P, ρ) platí $F(x_n) \rightarrow F(x_0)$ v (Q, σ) .

D.: \Rightarrow : Necht' $\{x_n\} \subseteq P$, $x_n \rightarrow x_0$. Buď $\mathcal{O}_\varepsilon(F(x_0))$, $\varepsilon > 0$, libovolné okolí bodu $F(x_0)$. Existuje $\delta > 0$ takové, že $F(\mathcal{O}_\delta(x_0)) \subseteq \mathcal{O}_\varepsilon(F(x_0))$. K $\delta > 0$ existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že pro všechna $n \geq n_0$ je $\rho(x_n, x_0) < \delta$, neboli $x_n \in \mathcal{O}_\delta(x_0)$. Odtud plyne, že $F(x_n) \in \mathcal{O}_\varepsilon(F(x_0))$ pro všechna $n \geq n_0$, neboli $\sigma(F(x_n), F(x_0)) < \varepsilon$ pro všechna $n \geq n_0$. To ovšem znamená, že $F(x_n) \rightarrow F(x_0)$.

\Leftarrow : Nechť platí podmínka a připuštěme, že F není spojitě v bodě x_0 . Pak existuje okolí $V = \mathcal{O}_\varepsilon(F(x_0))$ bodu $F(x_0)$ takové, že v každém okolí U bodu x_0 existuje x , že $F(x) \notin V$. Zejména v okolí $\mathcal{O}_{\frac{1}{n}}(x_0)$ existuje bod x_n takový, že $F(x_n) \notin V$. Platí $x_n \rightarrow x_0$ a tedy $F(x_n) \rightarrow F(x_0)$, což znamená, že existuje $n_0 \in \mathbb{N}$ takové, že $\sigma(F(x_{n_0}), F(x_0)) < \varepsilon$, tedy $F(x_{n_0}) \in \mathcal{O}_\varepsilon(F(x_0)) = V$, což je spor. \square

11.5.4 Věta

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $A \subseteq P$, $F : P \rightarrow Q$ spojitě zobrazení. Je-li množina A kompaktní, pak je i $F(A)$ kompaktní.

D.: Nechť A je kompaktní a buď $\{y_n\}$ libovolná posloupnost bodů z $F(A)$. Ke každému $y_n \in F(A)$ existuje $x_n \in A$ takové, že $F(x_n) = y_n$. Poněvadž A je kompaktní, lze z posloupnosti $\{x_n\}$ vybrat posloupnost konvergentní $\{x_{n_k}\}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \in A$ v (P, ρ) . Označme $y_0 = F(x_0)$. Pak $y_0 \in F(A)$ a podle 11.5.3 $\lim_{k \rightarrow \infty} y_{n_k} = \lim_{k \rightarrow \infty} F(x_{n_k}) = F(x_0) = y_0$ v (Q, σ) . Našli jsme tedy posloupnost $\{y_{n_k}\}$ vybranou z $\{y_n\}$, která konverguje k $y_0 \in F(A)$. To znamená, že $F(A)$ je kompaktní množina. \square

11.5.5 Důsledek (Weierstrassovy věty)

Reálná funkce spojitá na uzavřeném intervalu je na tomto intervalu ohraničená a nabývá na něm své největší a nejmenší hodnoty.

D.: Uzavřený interval $[a, b]$ je podle 11.4.8 kompaktní v (\mathbb{R}, ρ_1) a tedy podle 11.5.4 je $f([a, b])$ kompaktní. Podle 11.4.8 je $f([a, b])$ ohraničená a uzavřená. K $\frac{1}{n} > 0$ existuje $y_n \in f([a, b])$ takové, že $\sup f([a, b]) - \frac{1}{n} < y_n$, $y_n \rightarrow \sup f([a, b])$ a podle 11.3.7 je $\sup f([a, b]) \in f([a, b])$. Funkce f nabývá na $[a, b]$ svého suprema, tedy své největší hodnoty. Analogicky ukážeme, že funkce f nabývá na $[a, b]$ i své nejmenší hodnoty. \square

11.5.6 Věta

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) , (R, τ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$, $G : Q \rightarrow R$. Je-li zobrazení F spojitě v bodě $x_0 \in P$ a zobrazení G je spojitě v bodě $F(x_0) \in Q$, pak je složené zobrazení $G \circ F : P \rightarrow R$ spojitě v bodě x_0 . Je-li zobrazení F spojitě na P a zobrazení G je spojitě na Q , pak je složené zobrazení $G \circ F : P \rightarrow R$ spojitě na P .

D.: K $\mathcal{O}(G(F(x_0))) \subseteq R$ existuje $\mathcal{O}(F(x_0)) \subseteq Q$, že $G(\mathcal{O}(F(x_0))) \subseteq \mathcal{O}(G(F(x_0)))$, poněvadž G je spojitě v $F(x_0)$. K $\mathcal{O}(F(x_0)) \subseteq Q$ existuje $\mathcal{O}(x_0) \subseteq P$, že $F(\mathcal{O}(x_0)) \subseteq \mathcal{O}(F(x_0))$, neboť F je spojitě v x_0 . Nyní $G \circ F(\mathcal{O}(x_0)) = G(F(\mathcal{O}(x_0))) \subseteq G(\mathcal{O}(F(x_0))) \subseteq \mathcal{O}(G(F(x_0)))$. Druhé tvrzení je důsledkem prvního. \square

11.5.7 Definice

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$. Řekneme, že zobrazení F je *stejněměrně spojitě na P* , jestliže ke každému $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$ takové, že pro každé dva body $x, y \in P$ taková, že $\rho(x, y) < \delta$ platí $\sigma(F(x), F(y)) < \varepsilon$.

Stejněměrně spojitě zobrazení je zřejmě spojitě.

11.5.8 Věta (Heine - Cantor)

Buď (P, ρ) kompaktní metrický prostor, (Q, σ) metrický prostor, $F : P \rightarrow Q$ spojitě zobrazení. Pak je F stejněměrně spojitě.

D.: Nechť (P, ρ) je kompaktní a $F : P \rightarrow Q$ spojitě. Připuštěme, že F není stejněměrně spojitě. Pak existuje $\varepsilon_0 > 0$ takové, že ke každému $\delta > 0$ existují $x, y \in P$ tak, že $\rho(x, y) < \delta$ a $\sigma(F(x), F(y)) \geq \varepsilon_0$. K $\delta = \frac{1}{n}$ existují $x_n, y_n \in P$, že $\rho(x_n, y_n) < \frac{1}{n}$ a $\sigma(F(x_n), F(y_n)) \geq \varepsilon_0$. Poněvadž P je kompaktní, lze z posloupnosti $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ vybrat posloupnost $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ tak, že $\lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \in P$.

Dále $\rho(x_0, y_{n_k}) \leq \rho(x_0, x_{n_k}) + \rho(x_{n_k}, y_{n_k}) \rightarrow 0$ pro $k \rightarrow \infty$ a tedy také $\lim_{k \rightarrow \infty} y_{n_k} = x_0$.

Podle 11.5.3 platí $\sigma(F(x_{n_k}), F(y_{n_k})) \leq \sigma(F(x_{n_k}), F(x_0)) + \sigma(F(x_0), F(y_{n_k})) \rightarrow 0$ pro $k \rightarrow \infty$, což je spor s $\sigma(F(x), F(y)) \geq \varepsilon_0$. \square

11.5.9 Definice

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$.

Řekneme, že zobrazení F je *lipschitzovské*, jestliže existuje konstanta $L \in \mathbb{R}$, $L > 0$ taková, že pro všechny $x, y \in P$ je $\sigma(F(x), F(y)) \leq L\rho(x, y)$. Konstanta L se nazývá *Lipschitzova konstanta*.

Řekneme, že zobrazení F je *kontrakce*, je-li lipschitzovské s konstantou $L < 1$.

11.5.10 Věta

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$. Je-li zobrazení F lipschitzovské, pak je stejnoměrně spojitě (a tedy také spojitě).

D.: Necht F je lipschitzovské s konstantou L . Buď $\varepsilon > 0$ libovolné. Položíme $\delta = \frac{\varepsilon}{L}$.

Jsou-li $x, y \in P$ libovolné body takové, že $\rho(x, y) < \delta$, pak $\sigma(F(x), F(y)) \leq L\rho(x, y) < L\delta = L\frac{\varepsilon}{L} = \varepsilon$. \square

11.5.11 Příklady

1. Buď f reálná funkce definovaná na intervalu $[a, b]$, která má na tomto intervalu ohraničenou první derivaci. Pak f je lipschitzovská s konstantou $L = \sup\{|f'(x)| : x \in [a, b]\}$.

D.: Podle 2.5.4.1 ke každým $x, y \in [a, b]$ existuje ξ z intervalu o krajních bodech x a y takové, že

$$f(x) - f(y) = f'(\xi)(x - y).$$

$$\text{Odtud } |f(x) - f(y)| = |f'(\xi)| |x - y| \leq L|x - y|. \quad \square$$

2. $(C[a, b], \rho_C)$, (\mathbb{R}, ρ_1) , $F : C[a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ definované předpisem $F(f) = \int_a^b f(x)dx$.

$$\begin{aligned} \bullet \quad \rho_1(F(f), F(g)) &= \left| \int_a^b f(x)dx - \int_a^b g(x)dx \right| = \left| \int_a^b (f(x) - g(x))dx \right| \leq \int_a^b |f(x) - g(x)|dx \leq \\ &\leq \int_a^b \max\{|f(\xi) - g(\xi)| : \xi \in [a, b]\} dx = \max\{|f(\xi) - g(\xi)| : \xi \in [a, b]\} \int_a^b dx = \\ &= (b - a)\rho_C(f, g) \end{aligned}$$

(první nerovnost platí podle 5.2.9, druhá podle 5.2.6.)

Zobrazení F je tedy lipschitzovské s konstantou $b - a$, což podle 11.5.10 znamená, že je spojitě.

- Z 11.5.3 plyne: Jestliže posloupnost funkcí $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ spojitých na intervalu $[a, b]$ konverguje k funkci f v prostoru $(C[a, b], \rho_C)$ (stejněměrně konverguje k funkci f , sr. 11.3.2.3), pak platí

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x)dx.$$

11.5.12 Definice

Buďte (P, ρ) , (Q, σ) metrické prostory, $F : P \rightarrow Q$ a $x_0 \in P$ hromadný bod. Řekneme, že zobrazení F má v bodě $x_0 \in P$ limitu $y_0 \in Q$ a píšeme $\lim_{x \rightarrow x_0} F(x) = y_0$, jestliže ke každému okolí V bodu y_0 v (Q, σ) existuje okolí U bodu x_0 v (P, ρ) tak, že $F(U \setminus \{x_0\}) \subseteq V$.

Zřejmě platí:

- $\lim_{x \rightarrow x_0} F(x) = y_0 \Leftrightarrow (\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0)(\forall x \in P)(0 < \rho(x, x_0) < \delta \Rightarrow \sigma(F(x), F(x_0)) < \varepsilon)$.

- Jestliže má zobrazení F v bodě x_0 limitu $F(x_0)$, pak je v tomto bodě spojitě.

- $\lim_{x \rightarrow x_0} F(x) = y_0$ právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ bodů z P takovou, že pro každé $n \in \mathbb{N}$ je $x_n \neq x_0$ a $x_n \rightarrow x_0$ v (P, ρ) platí $F(x_n) \rightarrow y_0$ v (Q, σ) .

11.5.13 Definice

Nechť P je množina a $F : P \rightarrow P$. Bod $x \in P$ se nazývá *pevný bod zobrazení F* , jestliže $F(x) = x$.

11.5.14 Věta (Banach [1892–1945], o kontrakci)

Buď (P, ρ) úplný metrický prostor, $F : P \rightarrow P$ kontrakce. Pak existuje jediný pevný bod zobrazení F . Tento pevný bod je limitou posloupnosti $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, kde $x_1 \in P$ je libovolný bod a $x_{n+1} = F(x_n)$.

D.: • Nejdříve ukážeme, že posloupnost $\{x_n\}$, $x_{n+1} = F(x_n)$ je cauchyovská:

$$\begin{aligned} \text{Pro libovolné } n \in \mathbb{N} \text{ platí } \rho(x_n, x_{n+1}) &= \rho(F(x_{n-1}), F(x_n)) \leq L\rho(x_{n-1}, x_n) = L\rho(F(x_{n-2}), F(x_{n-1})) \leq \\ &\leq L^2\rho(x_{n-2}, x_{n-1}) = \dots \leq L^{n-1}\rho(x_1, x_2). \end{aligned}$$

Odtud a z (M3) plyne, že pro libovolná $n, p \in \mathbb{N}$ platí

$$\begin{aligned} \rho(x_n, x_{n+p}) &\leq \rho(x_n, x_{n+1}) + \rho(x_{n+1}, x_{n+2}) + \dots + \rho(x_{n+p-1}, x_{n+p}) \leq \\ &\leq L^{n-1}\rho(x_1, x_2) + L^n\rho(x_1, x_2) + L^{n+1}\rho(x_1, x_2) + \dots + L^{n+p-2}\rho(x_1, x_2) = \\ &= (L^{n-1} + L^n + L^{n+1} + \dots + L^{n+p-2})\rho(x_1, x_2) = (1 + L + L^2 + \dots + L^{p-1})L^{n-1}\rho(x_1, x_2) = \\ &= \frac{1 - L^p}{1 - L}L^{n-1}\rho(x_1, x_2) \leq L^{n-1}\frac{\rho(x_1, x_2)}{1 - L} \rightarrow 0 \text{ pro } n \rightarrow \infty, \text{ neboť } L^{n-1} \rightarrow 0 \text{ pro } n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

- Poněvadž (P, ρ) je úplný, existuje $x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \in P$.
- $\rho(x_0, F(x_0)) \leq \rho(x_0, x_n) + \rho(x_n, F(x_0)) = \rho(x_0, x_n) + \rho(F(x_{n-1}), F(x_0)) \leq \leq \rho(x_0, x_n) + L\rho(x_{n-1}, x_0) \rightarrow 0$ pro $n \rightarrow \infty$ neboť $\lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_0, x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \rho(x_{n-1}, x_0) = 0$ pro $n \rightarrow \infty$.
- Je-li y jiný pevný bod zobrazení F , pak $\rho(y, x_0) = \rho(F(y), F(x_0)) \leq L\rho(y, x_0)$. Odtud plyne, že $(1 - L)\rho(y, x_0) \leq 0$ a poněvadž $0 < L < 1$, musí být $\rho(y, x_0) = 0$. \square

11.5.15 Aplikace (Newtonova iterační metoda)

Nechť reálná funkce g má na uzavřeném intervalu I druhou derivaci a nenulovou první derivaci. Jestliže existuje $\varepsilon > 0$ takové, že pro každé $x \in I$ platí $\frac{|g(x)g''(x)|}{(g'(x))^2} < 1 - \varepsilon$, pak rovnice $g(x) = 0$ má na intervalu I jediný kořen x_0 a platí $x_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$, kde posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ je dána rekurentně:

$$x_1 \in I \text{ je libovolné číslo, } x_{n+1} = x_n - \frac{g(x_n)}{g'(x_n)}.$$

D.: Uvažujme metrický prostor (I, ρ) s přirozenou metrikou $\rho(x, y) = |x - y|$. Tento prostor je podle 11.4.8 kompaktní.

Definujme funkci $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ předpisem $f(x) = x - \frac{g(x)}{g'(x)}$. Číslo x_0 je kořenem rovnice $g(x) = 0$ právě tehdy, když je pevným bodem zobrazení (funkce) f . Podle 2.5.3 platí $\rho(f(x), f(y)) = |f(x) - f(y)| = |f'(\xi)||x - y|$, kde ξ je nějaké číslo mezi x a y . Označme $L = \sup\{|f'(\xi)| : \xi \in I\}$. Podle předpokladu

$$|f'(\xi)| = \left| 1 - \frac{(g'(\xi))^2 - g(\xi)g''(\xi)}{(g'(\xi))^2} \right| = \left| \frac{g(\xi)g''(\xi)}{(g'(\xi))^2} \right| < 1 - \varepsilon$$

pro každé $\xi \in I$. Funkce f je tedy kontrakcí a tvrzení plyne z 11.5.14. \square

11.6 Cvičení

1) Ověřte, že $\rho(x, y) = \ln(1 + |x - y|)$ a $\sigma(x, y) = \frac{|x - y|}{1 + |x - y|}$ jsou metriky na \mathbb{R} . Jsou tyto metriky ekvivalentní?

- 2) Vypočítejte vzdálenost funkcí $f(x) = \ln(1+x)$ a $g(x) = \frac{x}{e-1}$ v prostoru $C[0,1]$ s metrikami ρ_C a ρ_I .
- 3) Vypočítejte vzdálenost množiny $M = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 : y \geq \sqrt{|x|^3}\}$ od bodu $(\frac{1}{2}, 0)$ v prostoru (\mathbb{R}^2, ρ_2)
- 4) Vypočítejte vzdálenost bodu $(3,2)$ od množiny $M = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 : y + bx \leq 0\}$, kde $b \geq 0$, v prostoru (\mathbb{R}^2, ρ_1) .
- 5) Vypočítejte průměr množiny $M = \{f(x) = x^n : n \in \mathbb{N}\}$ v prostoru $(C[0,1], \rho_I)$.
- 6) Najděte vnitřek, uzávěr, hranici a derivaci množiny $A = \{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\} \cup [1,2) \cup ((2,3) \cap \mathbb{Q})$ v prostoru (\mathbb{R}, ρ) .
- 7) Rozhodněte, zda platí tvrzení: Jsou-li množiny A, B uzavřené a $\rho(A,B) = 0$, pak $A \cap B \neq \emptyset$. Pokud ano, dokažte; pokud ne, uveďte protipříklad.
- 8) Mohou existovat neprázdné podmnožiny A, B metrického prostoru takové, že $\overline{A} \subseteq \overline{B}$, $\overline{A} \neq \overline{B}$ a $A \cap B = \emptyset$? Pokud ne, dokažte; pokud ano, udejte příklad.
- 9) Nechť F je zobrazení prostoru $(C[a,b], \rho_C)$ do prostoru (\mathbb{R}, ρ) dané předpisem $F(f) = f\left(\frac{a+b}{2}\right)$. Rozhodněte, zda je toto zobrazení spojitě. Je stejně definované zobrazení spojitě na prostoru $(C[a,b], \rho_I)$?
- 10) Nechť A, B jsou neprázdné uzavřené a disjunktní množiny v prostoru (P, ρ) . Najděte spojitě zobrazení $F : P \rightarrow \mathbb{R}$ (\mathbb{R} uvažujeme s přirozenou metrikou ρ) takové, že $F(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \in B \end{cases}$.
- 11) Rozhodněte, zda zobrazení $F : [0,1] \rightarrow [0,1]$ dané předpisem $F(x) = \sqrt{x}$ je Lipschitzovské. Existuje pevný bod tohoto zobrazení?
- 12) Najděte kořen rovnice $\cos x = x$ s přesností na čtyři desetinná místa.

Výsledky: 1) Ano 2) $\ln(e-1) - \frac{e-2}{e-1} \doteq 0.1233$, $2 \ln 2 - \frac{1-2e}{2-2e} \doteq 0.0953$ 3) $\sqrt{\frac{7}{108}}$ 4) $2+3b$ pokud $b < 1$, $3 + \frac{2}{b}$, pokud $b \geq 1$ 5) $\frac{1}{2}$ 6) $A^\circ = (1,2) \cup (2,3)$, $\overline{A} = \{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\} \cup [1,3]$, $\partial A = \{\frac{1}{n} : n \in \mathbb{N}\} \cup [2,3]$, $A' = \{0\} \cup [1,3]$ 7) Ne. Např. v prostoru (\mathbb{R}^2, ρ_2) jsou množiny $A = \{(x,0) : x \geq 1\}$, $B = \{(x, \frac{1}{x}) : x \geq 1\}$ uzavřené a $\rho(A,B) = 0$. 8) Ano. Např. v prostoru (\mathbb{R}, ρ) množiny $A = [0,1] \cap \mathbb{I}$, $B = [0,2] \cap \mathbb{Q}$. 9) Ano, ne 10) $F(x) = \frac{\rho(x,B)}{\rho(x,A)+\rho(x,B)}$ 11) Ne. Dokonce dva: 0 a 1 12) 0.7391

11.7 Kontrolní otázky

- 1) **Uveďte Definicí x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 12

Diferenciální počet

12.1 Spojitost a limita

12.1.1 Definice

Buď $M \subseteq \mathbb{R}^n$, $M \neq \emptyset$. Zobrazení $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ nazveme (reálnou) funkcí n (reálných) proměnných. Množina M se nazývá *definiční obor funkce* f a značí se $\text{Dom } f$, množina $f(M)$ se nazývá *obor hodnot funkce* f a značí se $\text{Im } f$.

Zápis: $y = f(x)$, $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
pro $n = 2$: $z = f(x, y)$
pro $n = 3$: $u = f(x, y, z)$
a p.

12.1.2 Definice

Buď f funkce n proměnných. Řekneme, že tato funkce je *ohraničená*, je-li množina $\text{Im } f$ ohraničená (jakožto podmnožina \mathbb{R}).

Na množině \mathbb{R}^n uvažujeme některou z ekvivalentních metrik ρ_1 , ρ_2 , ρ_∞ (sr. 11.1.2.3 a 11.3.9.1). Na množině $\text{Dom } f$ potom je příslušná indukovaná metrika. Funkci n proměnných lze tedy považovat za zobrazení metrického prostoru $\text{Dom } f$ na metrický prostor $\text{Im } f$. O funkci f řekneme, že je *spojitá*, *stejněměrně spojitá*, *lipschitzovská*, je-li toto zobrazení *spojité*, *stejněměrně spojité*, *lipschitzovské*. Lze použít všechna tvrzení z 11.5.

Nebude-li řečeno jinak, budeme používat maximální metriku ρ_∞ . V tomto případě $\mathcal{O}_\varepsilon(x) = \mathcal{O}_\varepsilon(x_1, x_2, \dots, x_n) = (x_1 - \varepsilon, x_1 + \varepsilon) \times (x_2 - \varepsilon, x_2 + \varepsilon) \times \dots \times (x_n - \varepsilon, x_n + \varepsilon)$.

Abychom mohli i pro funkce n proměnných zavést pojem nevlastní limity, definujeme okolí nevlastních bodů: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in (\mathbb{R}^*)^n$, $\mathcal{O}(x) = (a_1, b_1) \times (a_2, b_2) \times \dots \times (a_n, b_n)$
kde $a_i = \begin{cases} x_i - \varepsilon, & x_i \in \mathbb{R} \\ -\infty, & x_i = -\infty \\ c \in \mathbb{R}, & x_i = \infty \end{cases}$, $b_i = \begin{cases} x_i + \varepsilon, & x_i \in \mathbb{R} \\ \infty, & x_i = \infty \\ c \in \mathbb{R}, & x_i = -\infty \end{cases}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

12.1.3 Definice

Buď f funkce n proměnných, x_0 hromadný bod množiny $\text{Dom } f$. Řekneme, že *funkce* f *má v bodě* x_0 *limitu* $a \in \mathbb{R}^*$ a píšeme $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a$, jestliže ke každému $\mathcal{O}(a)$ existuje $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že pro každé $x \in (\mathcal{O}(x_0) \cap \text{Dom } f) \setminus \{x_0\}$ platí $f(x) \in \mathcal{O}(a)$.

12.1.4 Věta (Heineova podmínka)

Funkce f n proměnných má v bodě x_0 limitu a právě tehdy, když pro každou posloupnost $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ takovou, že $x_n \in \text{Dom } f$ pro každé $n \in \mathbb{N}$, $x_n \neq x_0$ a $x_n \rightarrow x_0$ platí $f(x_n) \rightarrow a$.

D.: Analogicky důkazu 11.5.3. Věta již byla dokonce obecněji zformulována za 11.5.12 \square

12.1.5 Věta

1. Funkce f má v bodě x_0 nejvýše jednu limitu.
2. Má-li funkce f v bodě x_0 limitu $a \in \mathbb{R}$, pak existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že funkce f je na $(\mathcal{O}(x_0) \cap \text{Dom } f) \setminus \{x_0\}$ ohraničená.
3. Nechť $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$ a existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že funkce g je na $(\mathcal{O}(x_0) \cap \text{Dom } f) \setminus \{x_0\}$ ohraničená.
Pak $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)g(x) = 0$.
4. Nechť $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = a \in \mathbb{R}$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = b \in \mathbb{R}$. Pak platí:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |a|.$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) + g(x)) = a + b.$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) - g(x)) = a - b.$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x)g(x)) = ab.$$
 Je-li navíc $b \neq 0$, pak $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{a}{b}$.
5. Nechť existuje okolí $\mathcal{O}(x_0)$ takové, že pro $x \in (\mathcal{O}(x_0) \cap \text{Dom } f \cap \text{Dom } g \cap \text{Dom } h) \setminus \{x_0\}$ platí $f(x) \leq g(x) \leq h(x)$.
Jestliže $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = a \in \mathbb{R}^*$, pak $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = a$.

D.: Analogický důkazu podobných tvrzení v 2.1. \square

12.1.6 Věta (výpočet limity funkce dvou proměnných)

Funkce $z = f(x, y)$ má v bodě (x_0, y_0) limitu $a \in \mathbb{R}$ právě tehdy, když existuje $\rho > 0$ a funkce $g : (0, \rho) \rightarrow [0, \infty)$ taková, že $\lim_{r \rightarrow 0^+} g(r) = 0$ a

$$|f(x_0 + r \cos \varphi, y_0 + r \sin \varphi) - a| \leq g(r)$$

pro každé $r \in (0, \rho)$ a každé $\varphi \in [0, 2\pi)$.

D.: Na \mathbb{R}^2 uvažujme euklidovskou metriku ρ_2 .

Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. Poněvadž $\lim_{r \rightarrow 0^+} g(r) = 0$, existuje $\delta > 0$ takové, že pro $r \in (0, \delta)$ je $g(r) < \varepsilon$.

Tedy pro $x \in \mathcal{O}_\delta((x_0, y_0)) \setminus \{(x_0, y_0)\}$ platí $|f(x, y) - a| < \varepsilon$. \square

Příklad: $f(x, y) = \frac{x^2 + (y-1)^2 y}{x^2 + (y-1)^2}$, $(x_0, y_0) = (0, 1)$.

$$f(r \cos \varphi, 1 + r \sin \varphi) = \frac{r^2 \cos^2 \varphi + (1 + r \sin \varphi)r^2 \sin^2 \varphi}{r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi} = \frac{r^2 + r^3 \sin^3 \varphi}{r^2} = 1 + r \sin^3 \varphi$$

$\lim_{r \rightarrow 0^+} (1 + r \sin^3 \varphi) = 1$, což ukazuje, že a by se mohlo rovnat 1.

$$|f(r \cos \varphi, 1 + r \sin \varphi) - 1| = |r \sin^3 \varphi|$$

Poněvadž $\lim_{r \rightarrow 0^+} |r \sin^3 \varphi| = 0$, je $\lim_{(x,y) \rightarrow (x_0, y_0)} \frac{x^2 + (y-1)^2 y}{x^2 + (y-1)^2} = 1$.

12.2 Derivace

12.2.1 Definice

Bud' f funkce n proměnných, $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in \text{Dom } f$.

Položme $\varphi(x) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_{i-1}^0, x, x_{i+1}^0, x_{i+2}^0, \dots, x_n^0)$. Má-li funkce (jedné proměnné) φ v bodě x_i^0 vlastní derivaci, nazveme tuto derivaci *parciální derivací funkce f podle i -té proměnné v bodě x^0* a značíme ji $\frac{\partial f}{\partial x_i}(x^0)$, $f_{x_i}(x^0)$, $f'_{x_i}(x^0)$, $f'_{|i}(x^0)$.

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x^0) = \lim_{x \rightarrow x_i^0} \frac{f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_{i-1}^0, x, x_{i+1}^0, x_{i+2}^0, \dots, x_n^0) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_{i-1}^0, x_i^0, x_{i+1}^0, x_{i+2}^0, \dots, x_n^0)}{x - x_i^0}.$$

Má-li funkce f parciální derivaci f_{x_i} ve všech bodech nějaké množiny $M \subseteq \text{Dom } f$, je tato parciální derivace sama funkcí. Značíme ji $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, f_{x_i} , f'_{x_i} , $f'_{|i}$.

12.2.2 Poznámky

1. Z definice 12.2.1 plyne jednoduché pravidlo pro výpočet parciálních derivací:

$x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_n$ považujeme za parametry a x_i za proměnnou, podle níž derivujeme.

2. Funkce, která má v bodě x^0 parciální derivace podle všech proměnných, nemusí být v tomto bodě spojitá.

Např. $f(x, y) = \begin{cases} 1, & xy = 0 \\ 0, & xy \neq 0 \end{cases}$, $f_x(0, 0) = f_y(0, 0) = 0$ a f není spojitá v $(0, 0)$.

12.2.3 Věta

Nechť funkce f a g mají na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f \cap \text{Dom } g$ parciální derivaci $f'_{|i}$, $g'_{|i}$. Pak jejich součet, rozdíl a součin mají parciální derivaci podle i -té proměnné na M a platí:

$$(f \pm g)'_{|i}(x) = f'_{|i}(x) \pm g'_{|i}(x),$$

$$(fg)'_{|i}(x) = f'_{|i}(x)g(x) + f(x)g'_{|i}(x),$$

Ve všech bodech množiny M , v nichž $g(x) \neq 0$ navíc platí $\left(\frac{f}{g}\right)'_{|i}(x) = \frac{f'_{|i}(x)g(x) - f(x)g'_{|i}(x)}{(g(x))^2}$.

D.: Plyne z 2.3.5. \square

12.2.4 Věta (o střední hodnotě)

Nechť funkce f má parciální derivace ve všech bodech množiny $[a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_n, b_n] \subseteq \text{Dom } f$ podle všech proměnných. Pak existují čísla $\xi_1 \in (a_1, b_1), \xi_2 \in (a_2, b_2), \dots, \xi_n \in (a_n, b_n)$ taková, že

$$f(b_1, b_2, \dots, b_n) - f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^{\infty} f'_{|i}(b_1, b_2, \dots, b_{i-1}, \xi_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)(b_i - a_i).$$

Zejména pro $n = 2$: $f(x_1, y_1) - f(x_0, y_0) = f_x(\xi, y_0)(x_1 - x_0) + f_y(x_1, \eta)(y_1 - y_0)$, kde $\xi \in (x_0, x_1)$, $\eta \in (y_0, y_1)$.

D.: Provedeme pro $n = 2$. S využitím 2.5.3 dostaneme:

$$f(x_1, y_1) - f(x_0, y_0) = f(x_1, y_1) - f(x_1, y_0) + f(x_1, y_0) - f(x_0, y_0) = f_y(x_1, \eta)(y_1 - y_0) + f_x(\xi, y_0)(x_1 - x_0).$$

\square

12.2.5 Definice

Nechť funkce f má parciální derivaci podle i -té proměnné na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f$, $x^0 \in M$. Existuje-li parciální derivace funkce $f'_{|i}$ podle j -té proměnné v bodě x^0 , nazveme tuto derivaci *druhou parciální derivací*

funkce f podle i -té a j -té proměnné a značíme ji $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x^0)$, $f_{x_i x_j}(x^0)$, $f''_{x_i x_j}(x^0)$, $f''_{|i,j}(x^0)$. V případě, že $i \neq j$,

mluvíme o *smíšené parciální derivaci*.

Analogicky definujeme parciální derivace vyšších řádů v bodě x^0 .

Také parciální derivace vyšších řádů lze považovat za funkce.

12.2.6 Věta (Schwarz [1843 – 1921])

Nechť funkce f má parciální derivace $f_{x_i x_j}$, $f_{x_j x_i}$ spojité v bodě x^0 . Pak jsou tyto derivace záměnné, tj. $f_{x_i x_j}(x^0) = f_{x_j x_i}(x^0)$.

D.: Provedeme pro $n = 2$.

$$\text{Položme } F(h) = \frac{f(x_0 + h, y_0 + h) - f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0 + h) + f(x_0, y_0)}{h^2}$$

$$\varphi(y) = f(x_0 + h, y) - f(x_0, y), \quad \psi(x) = f(x, y_0 + h) - f(x, y_0).$$

S využitím 2.5.3 dostaneme

$$\begin{aligned} F(h) &= \frac{1}{h^2}(\varphi(y_0 + h) - \varphi(y_0)) = \frac{1}{h^2}\varphi'(y_0 + \vartheta_1 h)h = \\ &= \frac{1}{h}(f_y(x_0 + h, y_0 + \vartheta_1 h) - f_y(x_0, y_0 + \vartheta_1 h)) = \frac{1}{h}f_{yx}(x_0 + \vartheta_2 h, y_0 + \vartheta_1 h)h = \\ &= f_{yx}(x_0 + \vartheta_2 h, y_0 + \vartheta_1 h), \text{ kde } \vartheta_1, \vartheta_2 \in (0, 1). \end{aligned}$$

Analogicky odvodíme

$$F(h) = \frac{1}{h^2}(\psi(x_0 + h) - \psi(x_0)) = f_{xy}(x_0 + \vartheta_3 h, y_0 + \vartheta_4 h), \text{ kde } \vartheta_3, \vartheta_4 \in (0, 1).$$

Tedy $f_{yx}(x_0 + \vartheta_2 h, y_0 + \vartheta_1 h) = f_{xy}(x_0 + \vartheta_3 h, y_0 + \vartheta_4 h)$ a ze spojitosti druhých parciálních derivací plyne pro $h \rightarrow 0$: $f_{yx}(x_0, y_0) = f_{xy}(x_0, y_0)$. \square

12.2.7 Důsledek

Má-li funkce f na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f$ spojité parciální derivace až do řádu m , pak hodnota m -té parciální derivace v libovolném bodě této množiny závisí pouze na tom, kolikrát se derivovalo podle i -té proměnné ($i = 1, 2, \dots, n$), nikoliv na pořadí, v jakém se derivovalo.

12.2.8 Definice

Buď V_n n -rozměrný vektorový prostor nad \mathbb{R} , f funkce n proměnných, $x^0 \in \text{Dom } f$, $\vec{v} \in V_n$.

Položme $\varphi(t) = f(x^0 + t\vec{v})$. Má-li funkce φ derivaci v bodě 0, nazveme tuto derivaci *derivací funkce f ve směru \vec{v} v bodě x^0 (směrovou derivací)* a značíme ji $f'_{\vec{v}}(x^0)$, $f_{\vec{v}}(x^0)$.

Má-li funkce f derivaci ve směru \vec{v} ve všech bodech nějaké množiny $M \subseteq \text{Dom } f$, je tato směrová derivace sama funkcí, značíme ji $f_{\vec{v}}$.

$$f_{\vec{v}}(x) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + t\vec{v}) - f(x)}{t}.$$

12.2.9 Poznámky

1. Je-li $\vec{e}_i = (0, 0, \dots, 0, \overbrace{1}^i, 0, 0, \dots, 0)$ ($\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_n$ je standardní báze V_n), pak $f_{\vec{e}_i} = f'_{x_i}$.

2. Pro směrové derivace platí:

$$\begin{aligned} (f \pm g)_{\vec{v}} &= f_{\vec{v}} \pm g_{\vec{v}}, \\ (fg)_{\vec{v}} &= f_{\vec{v}}g + fg_{\vec{v}}, \\ \left(\frac{f}{g}\right)_{\vec{v}} &= \frac{f_{\vec{v}}g - fg_{\vec{v}}}{g^2}. \end{aligned}$$

3. Existují-li směrové derivace $f_{\vec{v}}(x^0)$ pro všechny $\vec{v} \in V_n$, funkce f nemusí být spojitá v x^0 .

Např. $f(x, y) = \begin{cases} 1, & y = x^2, x > 0 \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$ má derivace v $(0, 0)$ v jakémkoliv směru, ale není v tomto bodě spojitá.

12.2.10 Věta (o střední hodnotě)

Nechť funkce f má derivaci ve směru \vec{v} ve všech bodech úsečky $\{x : x = x^0 + t\vec{v}, t \in [0, t_0]\}$. Pak existuje $\vartheta \in (0, 1)$, že platí

$$f(x^0 + t_0\vec{v}) - f(x^0) = t_0 f_{\vec{v}}(x^0 + \vartheta t_0\vec{v}).$$

D.: Položme $\varphi(t) = f(x^0 + t\vec{v})$. Podle předpokladu pro každé $t \in [0, t_0]$ existuje $\varphi'(t)$. To podle 2.3.3 znamená, že φ je spojitá na $[0, t_0]$. Odtud dále podle 2.5.3 plyne $\varphi(t_0) - \varphi(0) = \varphi'(\vartheta t_0)t_0$, což je tvrzení. \square

12.2.11 Věta

Buď f funkce n proměnných, $\vec{v} \in V_n$. Jestliže existuje $f_{\vec{v}}(x)$, pak pro každé $c \in \mathbb{R}$ existuje $f_{c\vec{v}}(x)$ a platí $f_{c\vec{v}}(x) = cf_{\vec{v}}(x)$.

D.: $f_{c\vec{v}}(x) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + tc\vec{v}) - f(x)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} c \frac{f(x + tc\vec{v}) - f(x)}{ct} = cf_{\vec{v}}(x)$. \square

12.2.12 Věta

Buď f funkce n proměnných, $\vec{u} \in V_n, \vec{v} \in V_n, x^0 \in \text{Dom } f$. Nechť $f_{\vec{u}}$ existuje v x^0 a je spojitá v nějakém okolí $\mathcal{O}(x^0)$ a nechť $f_{\vec{v}}(x^0)$ existuje. Pak existuje $f_{\vec{u}+\vec{v}}(x^0)$ a platí $f_{\vec{u}+\vec{v}}(x^0) = f_{\vec{u}}(x^0) + f_{\vec{v}}(x^0)$.

D.: Položme $\varphi(t) = f(x^0 + t(\vec{u} + \vec{v}))$. S využitím 12.2.10 dostaneme

$$\begin{aligned} \frac{\varphi(t) - \varphi(0)}{t} &= \frac{f(x^0 + t\vec{u} + t\vec{v}) - f(x^0 + t\vec{v}) + f(x^0 + t\vec{v}) - f(x^0)}{t} = \\ &= \frac{f(x^0 + t\vec{u} + t\vec{v}) - f(x^0 + t\vec{v})}{t} + \frac{f(x^0 + t\vec{v}) - f(x^0)}{t} = \\ &= \frac{t f_{\vec{u}}(x^0 + \vartheta t\vec{v})}{t} + \frac{f(x^0 + t\vec{v}) - f(x^0)}{t} \rightarrow f_{\vec{u}}(x^0) + f_{\vec{v}}(x^0) \text{ pro } t \rightarrow 0. \end{aligned}$$

\square

Poznámka: Předpoklad o spojitosti $f_{\vec{u}}$ v nějakém okolí $\mathcal{O}(x^0)$ obecně nelze vynechat.

Např.: $f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy(x+y)}{x^2+y^2}, & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0, & (x, y) = (0, 0) \end{cases}, \quad (x^0, y^0) = (0, 0), \quad \vec{u} = (1, 0), \quad \vec{v} = (0, 1).$

$$f_{\vec{u}}(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t \cdot 0 \cdot (t+0)}{t^3} = 0, \quad f_{\vec{v}}(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{0 \cdot t \cdot (0+t)}{t^3} = 0, \quad f_{\vec{u}}(0, 0) + f_{\vec{v}}(0, 0) = 0,$$

$$f_{\vec{u}+\vec{v}}(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{tt(t+t)}{t(t^2+t^2)} = 1.$$

12.2.13 Definice

Buď f funkce n proměnných, $x^0 \in \text{Dom } f$ a nechť má f v x^0 derivaci ve směru každého vektoru $\vec{v} \in V_n$ a nechť funkce $\varphi : V_n \rightarrow \mathbb{R}$ daná předpisem $\varphi(\vec{v}) = f_{\vec{v}}(x^0)$ je lineární formou na V_n , což znamená, že existuje vektor $\vec{a} \in V_n$ takový, že $\varphi(\vec{v}) = \vec{a} \cdot \vec{v}$, kde \cdot značí skalární součin. Pak vektor \vec{a} nazveme *derivací (gradientem)* funkce f v bodě x^0 a značíme $\vec{a} = f'(x^0) = \nabla f(x^0) = \text{grad } f(x^0)$.

Má-li funkce f derivaci ve všech bodech nějaké množiny $M \subseteq \text{Dom } f$, pak je tato derivace zobrazením $M \rightarrow V_n$ (vektorovou funkcí). Značíme ji $f', \nabla f, \text{grad } f$.

12.2.14 Poznámky

1. Nechť funkce f má derivaci ve směru každého vektoru $\vec{v} \in V_n$ která je spojitou funkcí na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f$. Pak podle 12.2.11 a 12.2.12 má f na M derivaci.

2. Nechť $f'(x^0) = \vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\varphi(\vec{v}) = f_{\vec{v}}(x^0) = \vec{a} \cdot \vec{v}$, $\vec{e}_i = (0, 0, \dots, 0, \overbrace{1}^i, 0, 0, \dots, 0)$.
Pak $\varphi(\vec{e}_i) = \vec{a} \cdot \vec{e}_i = a_i$.
Tedy $a_i = f_{\vec{e}_i}(x^0) = f'_{\vec{e}_i}(x^0)$, $f'(x^0) = (f'_{\vec{e}_1}, f'_{\vec{e}_2}, \dots, f'_{\vec{e}_n})$.

3. Funkce, která má v bodě x_0 derivaci, nemusí být v tomto bodě spojitá. (Stejný příklad jako v 12.2.9.3)

4. Geometrický význam derivace:

Nechť f má derivaci v bodě $x^0 \in \text{Dom } f$. Pak pro libovolný vektor $\vec{v} \in V_n$ platí

$$f_{\vec{v}}(x^0) = f'(x^0) \cdot \vec{v} = \|f'(x^0)\| \|\vec{v}\| \cos \alpha, \text{ kde } \alpha \text{ je úhel, který svírají vektory } f'(x^0), \vec{v}.$$

Odtud plyne, že $f_{\vec{v}}(x^0)$ je maximální pro $\cos \alpha = 1$, tj. pro $\alpha = 0$, tedy v případě, že vektory $f'(x^0)$ a \vec{v} jsou rovnoběžné. To znamená, že směrová derivace je největší ve směry $f'(x^0)$.

Gradient — směr, ve kterém funkce nejrychleji roste.

12.3 Diferenciál

12.3.1 Definice

Nechť f je funkce n proměnných, $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ vnitřní bod $\text{Dom } f$. Řekneme, že funkce f je *diferencovatelná v bodě x^0* , jestliže existují reálná čísla a_1, a_2, \dots, a_n taková, že platí

$$\lim_{(h_1, h_2, \dots, h_n) \rightarrow (0, 0, \dots, 0)} \frac{f(x_1^0 + h_1, x_2^0 + h_2, \dots, x_n^0 + h_n) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - (a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n)}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2}} = 0.$$

Lineární funkce $df(x^0)$ daná předpisem $(h_1, h_2, \dots, h_n) \mapsto (a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n)$ se nazývá (*totální*) *diferenciál funkce f v bodě x^0* .

Ekvivalentní formulace: Funkce f je diferencovatelná v bodě x^0 , jestliže existují reálná čísla a_1, a_2, \dots, a_n a funkce n proměnných τ tak, že

$$\begin{aligned} & f(x_1^0 + h_1, x_2^0 + h_2, \dots, x_n^0 + h_n) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \\ & = (a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_n h_n) + \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2} \tau(h_1, h_2, \dots, h_n), \end{aligned}$$

přičemž

$$\lim_{(h_1, h_2, \dots, h_n) \rightarrow (0, 0, \dots, 0)} \tau(h_1, h_2, \dots, h_n) = 0.$$

Definice 12.3.1 je v souladu s definicí 2.4.3

$\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2}$ je euklidovská vzdálenost bodu (h_1, h_2, \dots, h_n) od počátku soustavy souřadnic. Místo ní lze uvažovat vzdálenost v libovolné ekvivalentní metrice.

12.3.2 Věta

Je-li funkce f diferencovatelná v bodě x^0 , pak je v tomto bodě spojitá.

$$\begin{aligned} \text{D.: } f(x) - f(x^0) &= f(x_1^0 + (x_1 - x_1^0), x_2^0 + (x_2 - x_2^0), \dots, x_n^0 + (x_n - x_n^0)) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \\ &= (a_1(x_1 - x_1^0) + a_2(x_2 - x_2^0) + \dots + a_n(x_n - x_n^0)) + \\ &+ \sqrt{(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2 + \dots + (x_n - x_n^0)^2} \tau((x_1 - x_1^0), (x_2 - x_2^0), \dots, (x_n - x_n^0)), \end{aligned}$$

z čehož plyne $\lim_{x \rightarrow x^0} f(x) = f(x^0)$. \square

12.3.3 Věta

Je-li funkce f diferencovatelná v bodě x^0 , pak má v tomto bodě parciální derivace podle všech proměnných a platí $a_1 = f'_{|1}(x^0), a_2 = f'_{|2}(x^0), \dots, a_n = f'_{|n}(x^0)$, neboli $df(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n) = \sum_{i=1}^n f'_{|i}(x^0) h_i$.

D.: Z 12.3.1 a 12.2.1 plyne

$$0 = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_{i-1}^0, x_i^0 + h, x_{i+1}^0, \dots, x_n^0) - f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - a_i h}{|h|} = \begin{cases} f'_{|i}(x_0) - a_i, & h \geq 0 \\ a_i - f'_{|i}(x_0), & h < 0 \end{cases}$$

a tedy $f'_{|i}(x_0) = a_i$. \square

12.3.4 Věta

Má-li funkce n proměnných f v bodě x^0 spojité parciální derivace podle všech proměnných, pak je v tomto bodě diferencovatelná.

D.: Pro stručnost zápisu provedeme pro $n = 2$.

Ze spojitosti parciálních derivací plyne jejich existence v jistém okolí bodu (x_0, y_0) .

S využitím 12.2.4 dostaneme:

$$\begin{aligned} & \lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} \frac{f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0) - f_x(x_0, y_0)h - f_y(x_0, y_0)k}{\sqrt{h^2 + k^2}} = \\ &= \lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} \frac{f_x(x_0 + \vartheta_1 h, y_0)h + f_y(x_0 + h, y_0 + \vartheta_2 k)k - f_x(x_0, y_0)h - f_y(x_0, y_0)k}{\sqrt{h^2 + k^2}} = \\ &= \lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} (f_x(x_0 + \vartheta_1 h, y_0) - f_x(x_0, y_0)) \frac{h}{\sqrt{h^2 + k^2}} + \lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} (f_y(x_0 + h, y_0 + \vartheta_2 k) - f_y(x_0, y_0)) \frac{k}{\sqrt{h^2 + k^2}} = \\ &= 0. \end{aligned}$$

Poslední rovnost plyne z 12.1.5.3, neboť f_x a f_y jsou spojité a $\left| \frac{h}{\sqrt{h^2 + k^2}} \right| \leq 1$, $\left| \frac{k}{\sqrt{h^2 + k^2}} \right| \leq 1$. \square

12.3.5 Poznámky

- Podobně jako za větou 2.4.5 lze zdůvodnit, že přírůstky h_1, h_2, \dots, h_n nezávisle proměnných můžeme označit dx_1, dx_2, \dots, dx_n .

$$\text{Diferenciál pak zapíšeme } df(x^0) = \sum_{i=1}^n f'_i(x^0) dx_i = \frac{\partial f(x^0)}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f(x^0)}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f(x^0)}{\partial x_n} dx_n.$$

$$d = \frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n$$

Zejména: $df(x, y) = f_x(x, y)dx + f_y(x, y)dy$

$$df = f_x dx + f_y dy = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy$$

$$d = \frac{\partial}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial y} dy$$

- Tečná rovina

Rovina $z = ax + by + c$ v prostoru \mathbb{R}^3 se nazývá tečná rovina ke grafu funkce $z = f(x, y)$ v bodě $T = (x_0, y_0, f(x_0, y_0))$, jestliže

$$f(x_0, y_0) = ax_0 + by_0 + c,$$

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{f(x, y) - ax - by - c}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} = 0.$$

Z těchto rovnic dostaneme:

$$\begin{aligned} 0 &= \lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{f(x, y) - f(x_0, y_0) + f(x_0, y_0) - ax - by - c}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} = \\ &= \lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{f(x, y) - f(x_0, y_0) - a(x - x_0) - b(y - y_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}. \end{aligned}$$

Podle 12.3.1 je tedy $df(x, y)(x - x_0, y - y_0) = a(x - x_0) + b(y - y_0)$, takže podle 12.3.3

$$a = f_x(x_0, y_0), \quad b = f_y(x_0, y_0).$$

Z první rovnice dostaneme $c = f(x_0, y_0) - x_0 f_x(x_0, y_0) - y_0 f_y(x_0, y_0)$.

Rovnice tečné roviny tedy je $z = f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0) + f(x_0, y_0)$.

Označíme-li $z_0 = f(x_0, y_0)$, je rovnice tečné roviny

$$z - z_0 = (f_x(x_0, y_0), f_y(x_0, y_0)) \cdot (x - x_0, y - y_0),$$

neboli

$$z - z_0 = f'(x_0, y_0) \cdot (x - x_0, y - y_0).$$

Obecně v $(n+1)$ -rozměrném prostoru je rovnice tečné nadroviny ke grafu funkce n proměnných $y = f(x)$ v bodě x^0

$$y - f(x^0) = f'(x^0) \cdot (x - x^0).$$

3. Geometrický význam diferenciálu: přírůstek funkce měřený na tečné nadrovině.
 $f(x) \approx f(x^0) + df(x^0)(x - x^0).$

4. Příklad funkce dvou proměnných, která má v bodě $(0,0)$ derivaci, je v tomto bodě spojitá, ale k jejímu grafu neexistuje v tomto bodě tečná rovina:

$$f(x, y) = \begin{cases} x, & y = x^2, x > 0 \\ \frac{2y}{x} - x, & \frac{x^2}{2} < y < x^2, x > 0 \\ 2x - \frac{y}{x}, & x^2 < y < 2x^2, x > 0 \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$$

Spojitosť a existence derivace v daném bodě tedy ještě nezaručí diferencovatelnost funkce.

12.3.6 Definice

Řekneme, že funkce n proměnných f je třídy C^m v bodě $x^0 \in \text{Dom } f$, existuje-li okolí $\mathcal{O}(x^0)$ bodu x^0 takové, že $\mathcal{O}(x^0) \subseteq \text{Dom } f$ a funkce f má na $\mathcal{O}(x^0)$ spojitě všechny parciální derivace až do řádu m včetně.

Řekneme, že funkce n proměnných f je třídy C^m na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f$, je-li třídy C^m v každém bodě množiny M .

Řekneme, že funkce n proměnných f je třídy C^∞ v bodě $x^0 \in \text{Dom } f$, je-li v tomto bodě třídy C^m pro každé $m \in \mathbb{N}$.

Řekneme, že funkce n proměnných f je třídy C^∞ na otevřené množině $M \subseteq \text{Dom } f$, je-li třídy C^∞ v každém bodě množiny M .

Z 12.3.4 plyne, že funkce třídy C^1 v bodě x^0 je v tomto bodě diferencovatelná.

12.3.7 Definice

Nechť funkce n proměnných f je třídy C^m v bodě x^0 . Diferenciál m -tého řádu funkce f v bodě x^0 definujeme vztahem

$$\begin{aligned} d^m f(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n) &= \sum_{i_1+i_2+\dots+i_n=m} \frac{m!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^m f(x^0)}{\partial x_1^{i_1} \partial x_2^{i_2} \dots \partial x_n^{i_n}} h_1^{i_1} h_2^{i_2} \dots h_n^{i_n} \\ d^m f(x^0) &= \sum_{i_1+i_2+\dots+i_n=m} \frac{m!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^m f(x^0)}{\partial x_1^{i_1} \partial x_2^{i_2} \dots \partial x_n^{i_n}} dx_1^{i_1} dx_2^{i_2} \dots dx_n^{i_n} = \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n \right)^m f(x^0) \\ d^m &= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} dx_n \right)^m \end{aligned}$$

Zejména pro $n = 2$:

$$\begin{aligned} d^m f(x_0, y_0)(h, k) &= \sum_{i=0}^m \binom{m}{i} \frac{\partial^m f(x_0, y_0)}{\partial x^i \partial y^{m-i}} h^i k^{m-i} \\ d^m f(x_0, y_0) &= \sum_{i=0}^m \binom{m}{i} \frac{\partial^m f(x_0, y_0)}{\partial x^i \partial y^{m-i}} dx^i dy^{m-i} = \left(\frac{\partial}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial y} dy \right)^m f(x_0, y_0) \end{aligned}$$

$$d^2 f = f_{xx} dx^2 + 2f_{xy} dx dy + f_{yy} dy^2$$

$$d^3 f = f_{xxx} dx^3 + 3f_{xxy} dx^2 dy + 3f_{xyy} dx dy^2 + f_{yyy} dy^3$$

12.3.8 Definice

Budte g_1, g_2, \dots, g_n funkce n proměnných. Funkce n proměnných F se nazývá *kmenová funkce diferenciálu*

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n)dx_1 + g_2(x_1, x_2, \dots, x_n)dx_2 + \dots + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)dx_n$$

na otevřené množině $M \subseteq \bigcap_{i=1}^n \text{Dom } g_i$, jestliže na této množině platí

$$F'_{|1}(x) = g_1(x), F'_{|2}(x) = g_2(x), \dots, F'_{|n}(x) = g_n(x), \text{ tj. } dF = \sum_{i=1}^n g_i dx_i.$$

12.3.9 Věta

Nechť g_1, g_2, \dots, g_n jsou funkce n proměnných, které jsou třídy C^1 na otevřené množině $M \subseteq \bigcap_{i=1}^n \text{Dom } g_i$. Kmenová funkce diferenciálu $g_1 dx_1 + g_2 dx_2 + \dots + g_n dx_n$ existuje právě tehdy, když

$$\frac{\partial g_i}{\partial x_j} = \frac{\partial g_j}{\partial x_i}$$

pro všechna $i, j = 1, 2, \dots, n$, $i \neq j$.

D.: Provedeme pro $n = 2$.

\Rightarrow : Nechť existuje kmenová funkce F , $dF = g_1 dx + g_2 dy$. Pak $F_x = g_1$, $F_y = g_2$.

Derivace $F_{xy} = g_{1y}$, $F_{yx} = g_{2x}$ jsou spojité a tedy podle 12.2.6 záměnné. To znamená, že

$$\frac{\partial g_1}{\partial y} = F_{xy} = F_{yx} = \frac{\partial g_2}{\partial x}.$$

\Leftarrow : Nechť $\frac{\partial g_1}{\partial y} = \frac{\partial g_2}{\partial x}$. Pro $(x_0, y_0), (x, y) \in M$ takové, že $\{(x_0 + t(x - x_0), y_0 + t(y - y_0)) : t \in [0, 1]\} \subseteq M$

položme $F(x, y) = \int_{x_0}^x g_1(t, y) dt + \int_{y_0}^y g_2(x_0, t) dt$. Pak podle 5.3.3

$$F_x(x, y) = g_1(x, y).$$

Dále s využitím 2.5.3 dostaneme

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \int_{x_0}^x g_1(t, y) dt &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\int_{x_0}^x g_1(t, y+h) dt - \int_{x_0}^x g_1(t, y) dt}{h} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \int_{x_0}^x \frac{g_1(t, y+h) - g_1(t, y)}{h} dt = \lim_{h \rightarrow 0} \int_{x_0}^x g'_{1|2}(t, y + \vartheta h) dt = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \int_{x_0}^x g'_{2|1}(t, y + \vartheta h) dt = \lim_{h \rightarrow 0} (g_2(x, y + \vartheta h) - g_2(x_0, y + \vartheta h)) = \\ &= g_2(x, y) - g_2(x_0, y) \end{aligned}$$

Odtud $F_y(x, y) = g_2(x, y) - g_2(x_0, y) + g_2(x_0, y) = g_2(x, y)$.

□

12.4 Derivace složené funkce, Taylorův vzorec

12.4.1 Věta (řetězové pravidlo)

Nechť f je funkce m proměnných a g_1, g_2, \dots, g_m jsou funkce n proměnných, které mají spojité parciální derivace prvního řádu v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. Označme $u_1^0 = g_1(x^0)$, $u_2^0 = g_2(x^0)$, \dots , $u_m^0 = g_m(x^0)$. Je-li funkce $z = f(u_1, u_2, \dots, u_m)$ diferencovatelná v bodě $(u_1^0, u_2^0, \dots, u_m^0)$, pak má složená funkce n proměnných

$z = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(g_1(x_1, x_2, \dots, x_n), g_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, g_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$ parciální derivace prvního řádu v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ a platí

$$F'_{|i}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \sum_{j=1}^m f'_{|j}(u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0) g'_{j|i}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial u_j}(u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0) \frac{\partial g_j}{\partial x_i}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0),$$

stručně

$$\frac{\partial z}{\partial x_i} = \frac{\partial z}{\partial u_1} \frac{\partial u_1}{\partial x_i} + \frac{\partial z}{\partial u_2} \frac{\partial u_2}{\partial x_i} + \dots + \frac{\partial z}{\partial u_m} \frac{\partial u_m}{\partial x_i},$$

nebo

$$z_{x_i} = z_{u_1} u_{1x_i} + z_{u_2} u_{2x_i} + \dots + z_{u_n} u_{nx_i}.$$

D.: Provedeme pro $m = n = 2$, $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$, $u_0 = u(x_0, y_0)$, $v_0 = v(x_0, y_0)$,

$$z = F(x, y) = f(u(x, y), v(x, y)).$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x}(x_0, y_0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + h, y_0) - F(x_0, y_0)}{h} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(u(x_0 + h, y_0), v(x_0 + h, y_0)) - f(u(x_0, y_0), v(x_0, y_0))}{h}. \end{aligned}$$

Poněvadž f je diferencovatelná v (u_0, v_0) , existuje podle 12.3.1 a 12.3.3 funkce $\tau = \tau(h, k)$ taková, že

$$\lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} \tau(h, k) = 0 \text{ a}$$

$$f(u(x_0 + h, y_0), v(x_0 + h, y_0)) - f(u_0, v_0) =$$

$$= f_u(u_0, v_0)(u(x_0 + h, y_0) - u_0) + f_v(u_0, v_0)(v(x_0 + h, y_0) - v_0) +$$

$$+ \sqrt{(u(x_0 + h, y_0) - u_0)^2 + (v(x_0 + h, y_0) - v_0)^2} \tau(u(x_0 + h, y_0) - u_0, v(x_0 + h, y_0) - v_0).$$

Označme $\alpha(h) = \sqrt{(u(x_0 + h, y_0) - u_0)^2 + (v(x_0 + h, y_0) - v_0)^2} \tau(u(x_0 + h, y_0) - u_0, v(x_0 + h, y_0) - v_0)$.

$$\begin{aligned} \text{Pak } \frac{\partial F}{\partial x}(x_0, y_0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (f_u(u_0, v_0)(u(x_0 + h, y_0) - u_0) + f_v(u_0, v_0)(v(x_0 + h, y_0) - v_0) + \alpha(h)) = \\ &= f_u(u_0, v_0)u_x(x_0, y_0) + f_v(u_0, v_0)v_x(x_0, y_0) + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\alpha(h)}{h}. \end{aligned}$$

Ukážeme, že $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\alpha(h)}{h} = 0$: Podle 2.5.6

$$\begin{aligned} &\lim_{h \rightarrow 0} \frac{(u(x_0 + h, y_0) - u_0)^2 + (v(x_0 + h, y_0) - v_0)^2}{h^2} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{2(u(x_0 + h, y_0) - u_0)u_x(x_0 + h, y_0) + 2(v(x_0 + h, y_0) - v_0)v_x(x_0 + h, y_0)}{2h} = \\ &= (u_x(x_0, y_0))^2 + (v_x(x_0, y_0))^2, \end{aligned}$$

tedy funkce $\frac{\sqrt{(u(x_0 + h, y_0) - u_0)^2 + (v(x_0 + h, y_0) - v_0)^2}}{h}$ je ohraničená a tvrzení plyne z 12.1.5.3.

Dokázali jsme tedy

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x_0, y_0) = f_u(u_0, v_0)u_x(x_0, y_0) + f_v(u_0, v_0)v_x(x_0, y_0).$$

Analogicky dokážeme

$$\frac{\partial F}{\partial y}(x_0, y_0) = f_u(u_0, v_0)u_y(x_0, y_0) + f_v(u_0, v_0)v_y(x_0, y_0).$$

□

12.4.2 Poznámky

1. Vzorce ve větě 12.4.1 lze zapsat maticově:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial x_1} & \frac{\partial z}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial z}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial u_1} & \frac{\partial z}{\partial u_2} & \cdots & \frac{\partial z}{\partial u_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial u_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial u_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_m}{\partial x_1} & \frac{\partial u_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial u_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

2. Pomocí řetězového pravidla lze počítat i druhé parciální derivace:

Nechť funkce $u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$ mají druhé parciální derivace v bodě (x_0, y_0) . Označme $u_0 = u(x_0, y_0)$, $v_0 = v(x_0, y_0)$. Je-li funkce $z = f(u, v)$ třídy C^2 v bodě (u_0, v_0) , pak složená funkce $z = F(x, y) = f(u(x, y), v(x, y))$ má druhé parciální derivace v bodě (x_0, y_0) a v něm platí

$$\begin{aligned} F_{xx} &= f_{uu}u_x^2 + 2f_{uv}u_xv_x + f_{vv}v_x^2 + f_uu_{xx} + f_vv_{xx} \\ F_{xy} &= f_{uu}u_xu_y + f_{uv}(u_xv_y + u_yv_x) + f_{vv}v_xv_y + f_uu_{xy} + f_vv_{xy} \\ F_{yy} &= f_{uu}u_y^2 + 2f_{uv}u_yv_y + f_{vv}v_y^2 + f_uu_{yy} + f_vv_{yy} \end{aligned}$$

D.: Odvodíme první formuli. Ostatní lze odvodit analogicky.

$$\begin{aligned} F_{xx} &= (z_x)_x = (z_uu_x + z_vv_x)_x = (z_u)_x u_x + z_uu_{xx} + (z_v)_x v_x + z_vv_{xx} = \\ &= (z_{uu}u_x + z_{uv}v_x)u_x + (z_{vu}u_x + z_{vv}v_x)v_x + z_uu_{xx} + z_vv_{xx} = \\ &= z_{uu}u_x^2 + z_{uv}u_xv_x + z_{vu}u_xv_x + z_{vv}v_x^2 + z_uu_{xx} + z_vv_{xx} . \end{aligned}$$

Odtud již plyne dokazovaná formule, neboť podle 12.3.6 a 12.2.6 je $z_{uv} = z_{vu} = f_{uv}$. \square

3. Předchozí vzorce si lze pamatovat pomocí formální mocniny nebo součinu. Např.:

$$\left(\frac{\partial}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2}{\partial u \partial v} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial v^2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 ,$$

což jsou první tři členy prvního vzorce.

4. Analogicky lze počítat i derivace vyšších řádů.

12.4.3 Věta (Taylor)

Nechť funkce n proměnných f je v bodě $x_0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ třídy C^{m+1} , tj, existuje okolí $\mathcal{O}(x^0)$ bodu x^0 takové, že f má na něm spojité parciální derivace až do řádu $m+1$ včetně. Buď $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}(x^0)$. Pak existuje $\vartheta \in (0, 1)$ takové, že platí

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \\ &+ \frac{1}{1!} (f_{x_1}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_1 - x_1^0) + f_{x_2}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_2 - x_2^0) + \cdots + f_{x_n}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_n - x_n^0)) + \cdots + \\ &+ \frac{1}{m!} \sum_{i_1+i_2+\dots+i_n=m} \frac{m!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^m f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\partial x_1^{i_1} \partial x_2^{i_2} \dots \partial x_n^{i_n}} (x_1 - x_1^0)^{i_1} (x_2 - x_2^0)^{i_2} \dots (x_n - x_n^0)^{i_n} + \\ &+ \frac{1}{(m+1)!} \sum_{i_1+\dots+i_n=m+1} \frac{(m+1)!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^{m+1} f(x_1^0 + \vartheta(x_1 - x_1^0), \dots, x_n^0 + \vartheta(x_n - x_n^0))}{\partial x_1^{i_1} \dots \partial x_n^{i_n}} (x_1 - x_1^0)^{i_1} \dots (x_n - x_n^0)^{i_n} . \end{aligned}$$

D.: Položme $F(t) = f(x_1^0 + t(x_1 - x_1^0), x_2^0 + t(x_2 - x_2^0), \dots, x_n^0 + t(x_n - x_n^0))$. Tvrzení nyní plyne z 2.6.8, 12.4.1 a 12.4.2.4 \square

Vzorec v předchozí větě se nazývá Taylorův.

Polynom n proměnných

$$T_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \\ + \frac{1}{1!} (f_{x_1}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_1 - x_1^0) + f_{x_2}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_2 - x_2^0) + \dots + f_{x_n}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_n - x_n^0)) + \dots + \\ + \frac{1}{m!} \sum_{i_1+i_2+\dots+i_n=m} \frac{m!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^m f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}{\partial x_1^{i_1} \partial x_2^{i_2} \dots \partial x_n^{i_n}} (x_1 - x_1^0)^{i_1} (x_2 - x_2^0)^{i_2} \dots (x_n - x_n^0)^{i_n} +$$

se nazývá *Taylorův polynom m -tého stupně funkce f se středem x^0* a výraz

$$R_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ = \frac{1}{(m+1)!} \sum_{i_1+\dots+i_n=m+1} \frac{(m+1)!}{i_1!i_2!\dots i_n!} \frac{\partial^{m+1} f(x_1^0 + \vartheta(x_1 - x_1^0), \dots, x_n^0 + \vartheta(x_n - x_n^0))}{\partial x_1^{i_1} \dots \partial x_n^{i_n}} (x_1 - x_1^0)^{i_1} \dots (x_n - x_n^0)^{i_n}$$

se nazývá *zbytek v Taylorově vzorci*.

Taylorův vzorec lze stručněji zapsat pomocí diferenciálů:

$$T_m(x) = f(x^0) + \frac{1}{1!} df(x^0)(x_1 - x_1^0, \dots, x_n - x_n^0) + \frac{1}{2!} d^2 f(x^0)(x_1 - x_1^0, \dots, x_n - x_n^0) + \dots + \\ + \frac{1}{m!} d^m f(x^0)(x_1 - x_1^0, \dots, x_n - x_n^0) \\ R_m(x) = \frac{1}{(m+1)!} d^{m+1} f(x^0)(x_1^0 + \vartheta(x_1 - x_1^0), \dots, x_n^0 + \vartheta(x_n - x_n^0))$$

12.5 Průběh funkce více proměnných

12.5.1 Definice

Řekneme, že funkce f nabývá v bodě x^* *lokálního maxima* (resp. *minima*), jestliže existuje okolí $\mathcal{O}(x^*)$ bodu x^* takové, že $\mathcal{O}(x^*) \subseteq \text{Dom } f$ a pro každé $x \in \mathcal{O}(x^*)$ platí $f(x) \leq f(x^*)$ (resp. $f(x) \geq f(x^*)$).

Jsou-li tyto nerovnosti pro $x \neq x^*$ ostré, mluvíme o *ostrém lokálním maximu* (resp. *minimu*).

(Ostrá) lokální maxima a minima nazýváme souhrnně *(ostré) lokální extrémy*.

12.5.2 Příklad

1. $f(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$ má v bodě (x^*, y^*) ostré lokální minimum, neboť $f(x, y) > 0 = f(0, 0)$ pro každý $(x, y) \in \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$.

2. $f(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) = (0, 0) \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$ má v bodě (x^*, y^*) ostré lokální maximum.

V bodě ostrého lokálního extrému funkce nemusí být diferencovatelná ani spojitá.

12.5.3 Definice

Řekneme, že $x^* \in \mathbb{R}^n$ je *stacionárním bodem funkce f* , jestliže f má v tomto bodě parciální derivace podle všech proměnných a platí

$$f'_{|1}(x^*) = f'_{|2}(x^*) = \dots = f'_{|n}(x^*) = 0.$$

12.5.4 Věta

Nechť funkce f má v bodě $x^* \in \mathbb{R}^n$ lokální extrém a nechť v tomto bodě existují všechny parciální derivace funkce f . Pak x^* je stacionárním bodem funkce f .

D.: Kdyby $f'_{|i}(x^*) > 0$, pak by podle 2.7.2 existovalo $\varepsilon > 0$, že

$$f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i^* - \varepsilon, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*) < f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i^*, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*)$$

$$f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i^* + \varepsilon, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*) > f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{i-1}^*, x_i^*, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*)$$

a tedy by v x^* nemohl být lokální extrém.

Podobně vyloučíme možnost $f'_{|i}(x^*) < 0$. \square

Poznámka: Stacionární bod nemusí být bodem lokálního extrému. Např. $f(x, y) = x^2 - y^2$, $(x^*, y^*) = (0, 0)$.

12.5.5 Definice

Je-li $x^* \in \mathbb{R}^n$ stacionárním bodem funkce f a f přitom nenabývá v x^* lokálního extrému, řekneme, že x^* je *sedlový bod* (*sedlo*) funkce f .

12.5.6 Několik pojmů z lineární algebry

- Nechť $A = (a_{ij})$ je symetrická matice, $\vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T \in V_n$, $\Phi(\vec{h}) = \vec{h}^T A \vec{h} = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} h_i h_j$ kvadratická forma.

Řekneme, že matice A je

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| <i>negativně semidefinitní</i> | $\Phi(\vec{h}) \leq 0$ |
| <i>negativně definitní</i> | $\Phi(\vec{h}) < 0$ |
| <i>pozitivně semidefinitní</i> | $\Phi(\vec{h}) \geq 0$ |
| <i>pozitivně definitní</i> | $\Phi(\vec{h}) > 0$ |

platí-li pro každý nenulový $\vec{h} \in V_n$

Řekneme, že matice A je *indefinitní*, existují-li vektory $\vec{h}, \vec{k} \in V_n$, že $\Phi(\vec{h}) < 0$, $\Phi(\vec{k}) > 0$.

- Platí:
 - Symetrická matice A je pozitivně (resp. negativně) definitní právě tehdy, když všechna vlastní čísla matice A jsou kladná (resp. záporná).
 - Symetrická matice A je pozitivně (resp. negativně) semidefinitní právě tehdy, když všechna vlastní čísla matice A jsou nezáporná (resp. nekladná).
 - Symetrická matice A je pozitivně definitní právě tehdy, když všechny hlavní minory matice A , tj. determinanty

$$a_{11}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \dots, \det A$$

jsou kladné.

Symetrická matice A je negativně definitní právě tehdy, když hlavní minory matice A střídají znaménka počínaje záporným.

12.5.7 Věta

Nechť $x^* \in \mathbb{R}^n$ je stacionární bod funkce f a nechť f je třídy C^2 v bodě x^* . Položme $A = (a_{ij}) = (f'_{|ij}(x^*))$.

Je-li matice A v pozitivně (resp. negativně) definitní, má funkce f v bodě x^* ostré lokální minimum (resp. maximum).

Je-li matice A indefinitní, funkce f nemá v bodě x^* lokální extrém.

D.: Nechť A je pozitivně definitní.

Buď $\vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n) \in V_n$ libovolný, ale pevně zvolený vektor. Položme $F_{\vec{h}}(x) = \sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x) h_i h_j$.

Poněvadž funkce f je třídy C^2 v bodě x^* , je funkce $F_{\vec{h}}$ spojitá v bodě x^* a poněvadž $(f'_{|ij}(x^*))$ je pozitivně

definitní, existuje okolí $\mathcal{O}(x^*)$ bodu x^* takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x^*)$ je $F_{\vec{h}}(x) > 0$.
 Poněvadž \vec{h} byl libovolný vektor, tak pro všechny $x, \hat{x} \in \mathcal{O}(x^*)$ platí $F_{x-x^*}(\hat{x}) > 0$.
 Nyní podle 12.4.3 je pro $x \in \mathcal{O}(x^*)$

$$f(x) = f(x^*) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x^* + \vartheta(x - x^*))(x_i - x_i^*)(x_j - x_j^*) = f(x^*) + \frac{1}{2} F_{x-x^*}(x^* + \vartheta(x - x^*)),$$

kde $\vartheta \in [0, 1]$. Tedy $x^* + \vartheta(x - x^*) \in \mathcal{O}(x^*)$ (uvažujeme euklidovskou metriku) a $f(x) > f(x^*)$, což znamená, že funkce f nabývá v bodě x^* svého ostrého lokálního minima.

Tvrzení pro maximum se dokáže analogicky.

Nechť A je nyní indefinitní. Pak existují vektory $\vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n), \vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_n) \in V_n$ takové, že $\sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x^*) h_i h_j < 0$ a $\sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x^*) k_i k_j > 0$. Poněvadž f je třídy C^2 v bodě x^* , existuje okolí $\mathcal{O}_1(x^*)$

bodu x^* takové, že pro všechna $x \in \mathcal{O}_1(x^*)$ je $\sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x) h_i h_j < 0$ a $\sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x) k_i k_j > 0$.

Buď $\mathcal{O}_2(x^*)$ libovolné okolí bodu x^* , δ_h, δ_k taková kladná čísla, že $x_1 = x^* + \delta_h \vec{h} \in \mathcal{O}_1(x^*) \cap \mathcal{O}_2(x^*)$ a $x_2 = x^* + \delta_k \vec{k} \in \mathcal{O}_1(x^*) \cap \mathcal{O}_2(x^*)$.

S využitím 12.4.3 dostaneme

$$f(x_1) = f(x^*) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x^* + \vartheta \delta_h \vec{h}) \delta_h^2 h_i h_j < f(x^*),$$

$$f(x_2) = f(x^*) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n f'_{|ij}(x^* + \vartheta \delta_k \vec{k}) \delta_k^2 k_i k_j > f(x^*),$$

takže v bodě x^* není lokální extrém funkce f . \square

Je-li matice $(f'_{|ij}(x^*))$ pozitivně nebo negativně semidefinitní, nelze o kvalitě stacionárního bodu rozhodnout.

12.5.8 Důsledek

Nechť funkce dvou proměnných f je třídy C^2 ve svém stacionárním bodě (x^*, y^*) . Jestliže

$$D(x^*, y^*) = f_{xx}(x^*, y^*) f_{yy}(x^*, y^*) - (f_{xy}(x^*, y^*))^2 > 0,$$

pak má funkce f v bodě (x^*, y^*) ostrý lokální extrém a to minimum, pokud $f_{xx}(x^*, y^*) > 0$ a maximum, pokud $f_{xx}(x^*, y^*) < 0$.

Jestliže $D(x^*, y^*) < 0$, pak v bodě (x^*, y^*) lokální extrém nenastává.

D.: První tvrzení bezprostředně plyne z 12.5.7 a z tvrzení o minech v 12.5.6.

Nechť $D(x^*, y^*) < 0$. Uvažujme kvadratickou formu

$$\begin{aligned} \Phi(h_1, h_2) &= f_{xx}(x^*, y^*) h_1^2 + 2f_{xy}(x^*, y^*) h_1 h_2 + f_{yy}(x^*, y^*) h_2^2 = \\ &= h_2^2 \left(f_{xx}(x^*, y^*) \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2 + 2f_{xy}(x^*, y^*) \frac{h_1}{h_2} + f_{yy}(x^*, y^*) \right). \end{aligned}$$

Poněvadž $D(x^*, y^*) < 0$ má kvadratický polynom $P(\lambda) = f_{xx}(x^*, y^*) \lambda^2 + 2f_{xy}(x^*, y^*) \lambda + f_{yy}(x^*, y^*)$ dva reálné různé kořeny, což znamená, že nabývá kladných i záporných hodnot. Existují tedy vektory $(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2)$ a (\hat{h}_1, \hat{h}_2) takové, že $\Phi(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2) > 0$ a $\Phi(\hat{h}_1, \hat{h}_2) < 0$. To znamená, že forma Φ je indefinitní. \square

12.5.9 Definice

Buď f funkce n proměnných, $M \subseteq \text{Dom } f$. Řekneme, že funkce f nabývá v bodě $x^* \in M$ *globálního minima* (resp. *maxima*) na množině M , jestliže $f(x) \geq f(x^*)$ (resp. $f(x) \leq f(x^*)$) pro každé $x \in M$. Jsou-li nerovnosti ostré pro každé $x \neq x^*$, mluvíme o *ostrých globálních minimech* (resp. *maximech*) na M .

(Ostrá) globální maxima a minima nazýváme souhrnně (*ostré*) *globální extrémy* funkce f na množině M .

Místo slova „globální“ se někdy používá slovo „absolutní“.

12.5.10 Poznámka

Je-li bod globálního extrému x^* na množině M vnitřním bodem této množiny, pak je x^* bodem lokálního extrému.

Funkce f tedy může mít globální extrém na množině M v bodě lokálního extrému funkce f nebo v hraničním bodě množiny M , pokud tento bod do množiny M patří.

12.5.11 Poznámka

Nechť funkce f je třídy C^2 v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$.

Grafem funkce $g : (x_1, x_2, \dots, x_n) \mapsto f(x^0) + f'_1(x^0)(x_1 - x_1^0) + f'_2(x^0)(x_2 - x_2^0) + \dots + f'_n(x^0)(x_n - x_n^0)$ je podle 12.3.5.2 tečná nadrovina ke grafu funkce f v bodě x^0 .

Nechť $A = (a_{ij}) = (f''_{ij}(x^0))$.

Stejným způsobem jako v důkazu věty 12.5.7 lze dokázat:

Je-li matice A pozitivně definitní, pak existuje okolí $\mathcal{O}(x^0)$ bodu x^0 takové, že pro všechna $x \in \mathcal{O}(x^0)$ je $f(x) > g(x)$. Body grafu funkce f v okolí bodu x^0 leží nad tečnou nadrovinou, funkce je v bodě x^0 konvexní.

Je-li matice A negativně definitní, pak existuje okolí $\mathcal{O}(x^0)$ bodu x^0 takové, že pro všechna $x \in \mathcal{O}(x^0)$ je $f(x) < g(x)$. Body grafu funkce f v okolí bodu x^0 leží pod tečnou nadrovinou, funkce je v bodě x^0 konkávní.

12.6 Cvičení

Zjistěte, zda existuje limita funkce $y = f(x, y)$ v daném bodě (x_0, y_0) ; pokud ano, vypočítejte ji.

- 1) $f(x, y) = \frac{x^2 y^2}{x^2 y^2 - (x - y)^2}$, $(0, 0)$,
- 2) $f(x, y) = \frac{x^3 y^3}{x^2 + y^2}$, $(0, 0)$,
- 3) $f(x, y) = \frac{x^2 + y(y - 1)^2}{x^2 + (y - 1)^2}$, $(0, 1)$,
- 4) $f(x, y) = \frac{1}{xy} \operatorname{tg} \frac{xy}{1 + xy}$, $(0, \infty)$,
- 5) $f(x, y) = \sin \frac{\pi x}{2x + y}$, (∞, ∞) ,
- 6) $f(x, y) = \log_x(x + y)$, $(1, 0)$.

Vypočítejte parciální derivace prvního a druhého řádu funkcí

$$7) f(x, y) = xy + \frac{x}{y}, \quad 8) f(x, y) = \ln(x + y^2), \quad 9) f(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{x + y}{1 - xy},$$

$$10) f(x, y) = x^y, \quad 11) f(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad 12) f(x, y, z) = \left(\frac{x}{y}\right)^z.$$

13) Ukažte, že funkce $f(x, y) = \ln \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2}$ (resp. $f(x, y, z) = 1/\sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2}$) splňuje Laplaceovu rovnici $f_{xx} + f_{yy} = 0$ (resp. $f_{xx} + f_{yy} + f_{zz} = 0$).

14) Najděte derivaci funkce $f(x, y) = x^2 - xy + y^2$ ve směru jednotkového vektoru, který svírá úhel α s kladným směrem osy x , v bodě $(1, 1)$. Pro jaké α je tato derivace největší, nejmenší, rovna nule?

15) Vypočítejte směrovou derivaci funkce $f(x, y) = 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$ v bodě $\left(\frac{a}{\sqrt{2}}, \frac{b}{\sqrt{2}}\right)$, ve směru jednotkového vektoru vnitřní normály ke křivce $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ v bodě $\left(\frac{a}{\sqrt{2}}, \frac{b}{\sqrt{2}}\right)$.

16) Vypočítejte úhel mezi gradienty funkce $f(x, y, z) = x^2 + y^2 - z^2$ v bodech $(\varepsilon, 0, 0)$, $(0, \varepsilon, 0)$.

17) Najděte příklad funkce $z = f(x, y)$, která je v bodě $(0, 0)$ spojitá, má v něm derivaci, ale nemá diferenciál.

Vypočítejte první diferenciál dané funkce v daném bodě

$$18) f(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{x + y}{1 - xy}, \quad (\sqrt{3}, 1), \quad 19) f(x, y, z) = x^{y^z}, \quad (e, 1, 0).$$

20) Najděte rovnici tečné roviny k elipsoidu $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$ v bodě (x_1, y_1, z_1) .

Zjistěte, zda následující výrazy jsou diferenciály nějaké kmenové funkce. Pokud ano, určete ji.

$$21) \frac{dx}{1 + x^2} + \frac{dy}{1 + y^2}, \quad 22) \frac{y dx - x dy}{2x^2 + 2xy + y^2},$$

$$23) (3x^2 - 3yz + 2)dx + (3y^2 - 3xz + \ln y + 1)dy + (3z^2 - 3xy + 1)dz.$$

Najděte první a druhé parciální derivace složených funkcí

$$24) u(x, y) = f\left(\frac{y}{x}\right), \quad 25) u(x, y) = f\left(xy, \frac{x}{y}\right), \quad 26) u(x, y, z) = f\left(\frac{x}{y}, \frac{y}{z}\right).$$

Ukažte, že funkce u splňuje danou rovnici (φ, ψ jsou libovolné funkce).

27) $yu_x - xu_y = 0$, $u(x, y) = \varphi(x^2 + y^2)$, 28) $xu_x + \alpha yu_y + \beta zu_z = nu$, $u(x, y, z) = x^n \varphi\left(\frac{y}{x^\alpha}, \frac{z}{x^\beta}\right)$,

29) $u_{xx} - 2u_{xy} + u_{yy} = 0$, $u(x, y) = x\varphi(x + y) + y\psi(x + y)$.

Postupným derivováním eliminujte z výrazů funkce φ , ψ .

30) $u(x, y) = x + \varphi(xy)$, 31) $u(x, y, z) = \varphi(x - y, y - z)$, 32) $u(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$.

Diferenciální rovnice transformujte do nových proměnných ξ , η .

33) $x^2u_{xx} - y^2u_{yy} = 0$, $\xi = \frac{y}{x}$, $\eta = xy$.

34) $y^2u_{xx} + x^2u_{yy} - 2xyu_{xy} = xu_x + yu_y$, $\xi = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\eta = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$.

35) $(1 + x^2)u_{xx} + (1 + y^2)u_{yy} + xu_x + yu_y = 0$, $\xi = \ln|y + \sqrt{1 + y^2}|$, $\eta = \ln|x + \sqrt{1 + x^2}|$.

Určete Taylorův polynom 2. stupně s daným středem následujících funkcí

36) $f(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{1 + x + y}{1 - x + y}$, $(0, 0)$, 37) $f(x, y) = x^y$, $(1, 1)$,

38) $f(x, y, z) = \frac{x^3 + y^3 + z^3}{3} - xyz$, $(1, 1, 1)$.

Najděte stacionární body daných funkcí a určete jejich druh

39) $f(x, y) = x^2 - y^2 + 2y - 1$, 40) $f(x, y) = x^2 + y^2 - 2xy + 2x - 2y + 1$,

41) $f(x, y) = x^3 + y^3 - 3xy$, 42) $f(x, y, z) = x^3 + y^2 + \frac{z^2}{2} - 3xz - 2y + 2z$,

43) $f(x, y, z) = xy^2z^3(1 - x - 2y - 3z)$, 44) $f(x, y, z) = \sin x + \sin y + \sin z - \sin(x + y + z)$.

Výsledky: 1) neexistuje 2) 0 3) 1 4) neexistuje 5) neexistuje 6) neexistuje 7) $f_x = y + \frac{1}{y}$, $f_y = x - \frac{x}{y^2}$,

$f_{xx} = 0$, $f_{yy} = \frac{2x}{y^3}$, $f_{xy} = 1 - \frac{1}{y^2}$ 8) $f_x = \frac{1}{x+y^2}$, $f_y = \frac{2y}{x+y^2}$, $f_{xx} = \frac{-1}{(x+y^2)^2}$, $f_{yy} = \frac{2x-2y^2}{(x+y^2)^2}$, $f_{xy} = \frac{-2y}{(x+y^2)^2}$

9) $f_x = \frac{1}{x^2+1}$, $f_y = \frac{1}{y^2+1}$, $f_{xx} = \frac{-2x}{(x^2+1)^2}$, $f_{yy} = \frac{-2y}{(y^2+1)^2}$, $f_{xy} = 0$ 10) $f_x = yx^{y-1}$, $f_y = x^y \ln x$,

$f_{xx} = (y^2 - y)x^{y-2}$, $f_{yy} = x^y (\ln x)^2$, $f_{xy} = x^{y-1}(1 + y \ln x)$ 11) $f_x = \frac{-x}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^3}}$, $f_y = \frac{-y}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^3}}$,

$f_z = \frac{-z}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^3}}$, $f_{xx} = \frac{2x^2-y^2-z^2}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$, $f_{yy} = \frac{-x^2+2y^2-z^2}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$, $f_{zz} = \frac{-x^2-y^2+2z^2}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$,

$f_{xy} = \frac{3xy}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$, $f_{xz} = \frac{3xz}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$, $f_{yz} = \frac{3yz}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)^5}}$ 12) $f_x = \frac{z}{x} \left(\frac{x}{y}\right)^z$, $f_y = -\frac{z}{y} \left(\frac{x}{y}\right)^z$, $f_z = \left(\frac{x}{y}\right)^z \ln \frac{x}{y}$,

$f_{xx} = \frac{z^2-z}{x^2} \left(\frac{x}{y}\right)^z$, $f_{yy} = \frac{z^2+z}{y^2} \left(\frac{x}{y}\right)^z$, $f_{zz} = \left(\frac{x}{y}\right)^z \left(\ln \frac{x}{y}\right)^2$, $f_{xy} = -\frac{z^2}{xy} \left(\frac{x}{y}\right)^z$, $f_{xz} = \frac{1+z \ln \frac{x}{y}}{x} \left(\frac{x}{y}\right)^z$,

$f_{yz} = -\frac{1+z \ln \frac{x}{y}}{y} \left(\frac{x}{y}\right)^z$ 14) $\cos \alpha + \sin \alpha$, $\frac{\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$ nebo $\frac{7\pi}{4}$ 15) $\frac{\sqrt{2(a^2+b^2)}}{ab}$ 16) $\frac{\pi}{2}$

17) $f(x, y) = \begin{cases} 2x^2 - y, & x > 0, y \in [x^2, 2x^2] \\ 2y - x^2, & x > 0, y \in \left(\frac{x^2}{2}, x^2\right) \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$ 18) $\frac{dx}{4} + \frac{dy}{2}$ 19) dx 20) $\frac{xx_1}{a^2} + \frac{yy_1}{b^2} + \frac{zz_1}{c^2} = 1$ 21) $\operatorname{arctg} \frac{x+y}{1-xy}$

22) $-\operatorname{arctg} \frac{x+y}{x}$ 23) $x^3 + y^3 + z^3 - 3xyz + 2x + z + y \ln y$ 24) $u_x = -\frac{y}{x^2} f' \left(\frac{y}{x}\right)$, $u_y = \frac{1}{x} f' \left(\frac{y}{x}\right)$,

$u_{xx} = \frac{y}{x^3} \left(2f' \left(\frac{y}{x}\right) + \frac{y}{x} f'' \left(\frac{y}{x}\right)\right)$, $u_{yy} = \frac{1}{x^2} f'' \left(\frac{y}{x}\right)$, $u_{xy} = -\frac{1}{x^2} \left(f' \left(\frac{y}{x}\right) + \frac{y}{x} f'' \left(\frac{y}{x}\right)\right)$ 25) $u_x = yf'_{|1} + \frac{1}{y} f'_{|2}$,

$u_y = xf'_{|1} - \frac{x}{y^2} f'_{|2}$, $u_{xx} = y^2 f''_{|11} + 2f''_{|12} + \frac{1}{y^2} f''_{|22}$, $u_{yy} = x^2 f''_{|11} - 2\frac{x^2}{y^2} f''_{|12} + \frac{x^2}{y^4} f''_{|22} + \frac{2x}{y^3} f'_{|2}$,

$u_{xy} = xyf''_{|11} - \frac{x}{y^3} f''_{|22} + f'_{|1} - \frac{1}{y^2} f'_{|2}$ 26) $u_x = \frac{1}{y} f'_{|1}$, $u_y = -\frac{x}{y^2} f'_{|1} + \frac{1}{z} f'_{|2}$, $u_z = -\frac{y}{z^2} f'_{|2}$, $u_{xx} = \frac{1}{y^2} f''_{|11}$,

$u_{yy} = \frac{x^2}{y^4} f''_{|11} - \frac{2x}{y^2} f''_{|12} + \frac{1}{z^2} f''_{|22} + \frac{x}{y^3} f'_{|1}$, $u_{zz} = \frac{y^2}{z^4} f''_{|22} + \frac{2y}{z^3} f'_{|2}$, $u_{xy} = -\frac{x}{y^3} f''_{|11} + \frac{1}{yz} f''_{|12} - \frac{1}{y^2} f'_{|1}$, $u_{xz} = -\frac{1}{z^2} f''_{|12}$,

$u_{yz} = \frac{x}{yz^2} f''_{|12} - \frac{y}{z^3} f''_{|22} - \frac{1}{z^2} f'_{|2}$ 30) $xu_x - yu_y = x$ 31) $u_x + u_y + u_z = 0$ 32) $uu_{xy} = u_x u_y$ 33) $u_{\xi\eta} = \frac{1}{2\eta} u_{\xi}$

34) $u_{\eta\eta} = 0$ 35) $u_{\xi\xi} + u_{\eta\eta} = 0$ 36) $\frac{\pi}{4} + x - xy$ 37) $1 - y + xy$

38) $(x-1)^2 + (y-1)^2 + (z-1)^2 - (x-1)(y-1) - (x-1)(z-1) - (y-1)(z-1)$ 39) $(0, 1)$ sedlo

40) na přímce $y = x + 1$ (neostré) lokální minimum 41) $(1, 1)$ ostré lokální minimum, $(0, 0)$ sedlo 42) $(2, 1, 4)$ ostré lokální minimum, $(1, 1, 1)$ sedlo 43) $\left(\frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7}\right)$ ostré lokální maximum, $(0, y, \frac{1}{3}(2y-1))$, $(x, 0, y)$, $(x, y, 0)$ nejsou ostré lokální extrémy 44) $\left(\frac{2k+1}{2}\pi, \frac{2k+1}{2}\pi, \frac{2k+1}{2}\pi\right)$ ostré lokální maximum, $(k\pi, k\pi, k\pi)$ ostré lokální minimum

12.7 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definici x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 13

Implicitní funkce a zobrazení

13.1 Implicitní funkce

13.1.1 Definice

Nechť F je funkce dvou proměnných, $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ je takový bod, že $F(x_0, y_0) = 0$ a $\delta > 0$ je reálné číslo. Řekneme, že funkce $y = f(x)$ je na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ zadána implicitně rovnicí $F(x, y) = 0$, jestliže pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ je $F(x, f(x)) = 0$.

13.1.2 Věta

Nechť F je funkce dvou proměnných a jsou splněny předpoklady:

- existuje $(x_0, y_0) \in \text{Dom } F$, že $F(x_0, y_0) = 0$,
- existuje $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, že F je spojitá na množině $R = (x_0 - a, x_0 + a) \times (y_0 - a, y_0 + a) \cap \text{Dom } F$,
- F má spojitou parciální derivaci podle y v bodě (x_0, y_0) a platí $\frac{\partial F(x_0, y_0)}{\partial y} \neq 0$.

Pak existuje kladné číslo δ a jediná spojitá funkce $y = f(x)$, která je na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ zadána implicitně rovnicí $F(x, y) = 0$.

D.: Na \mathbb{R}^2 uvažujme metriku ρ_∞ a položme $d = F_y(x_0, y_0)$. Podle předpokladu je $d \neq 0$.

Poněvadž F_y je spojitá v bodě (x_0, y_0) , k $\frac{|d|}{2} > 0$ existuje $\varepsilon > 0$ takové, že pro

$(x, y) \in \mathcal{O}_\varepsilon(x_0, y_0) = (x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon) \times (y_0 - \varepsilon, y_0 + \varepsilon)$ je $|F_y(x, y) - d| < \frac{|d|}{2}$,

neboli pro $(x, y) \in \mathcal{O}_\varepsilon(x_0, y_0)$ je

$$\left| 1 - \frac{F_y(x, y)}{d} \right| < \frac{1}{2}. \quad (13.1)$$

Buď $Q = \{g \in C[x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] : g(x_0) = y_0, |g(x) - y_0| < \varepsilon \text{ pro } x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]\}$. Pro $g \in Q$ tedy platí $g(x_0) = y_0$, $F(x_0, g(x_0)) = F(x_0, y_0) = 0$, g i F jsou spojitě a tedy k ε existuje $\delta_1 > 0$ takové, že pro $x \in [x_0 - \delta_1, x_0 + \delta_1]$ je

$$\left| g(x) - \frac{F(x, g(x))}{d} - y_0 \right| < \varepsilon. \quad (13.2)$$

Položme $\delta = \min\{\varepsilon, \delta_1\}$ a $P = Q \cap C[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$. Množina P tedy obsahuje funkce z Q , jejichž definiční obor je zúžen na $[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$.

Definujme zobrazení $T : P \rightarrow C[x_0 - \delta, x_0 + \delta]$ předpisem: $T(g)(x) = g(x) - \frac{F(x, g(x))}{d}$. Je-li funkce f

pevným bodem zobrazení T (sr. 11.5.13), pak $f(x) = f(x) - \frac{F(x, f(x))}{d}$ pro $x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$, neboli $F(x, f(x)) = 0$ pro $x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$, tj. f je spojitá funkce, která je na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ implicitně zadána rovnicí $F(x, y) = 0$.

Existenci jediné funkce f této vlastnosti dokážeme pomocí Banachovy věty o kontrakci **11.5.14**. Na P uvažujme metriku stejnoměrné konvergence ρ_C (viz **11.1.2.4**). Pak

$$T(g)(x_0) = g(x_0) - \frac{F(x_0, g(x_0))}{d} = y_0 \text{ pro } g \in Q.$$

$|T(g)(x) - y_0| < \varepsilon$ podle **(13.2)** pro $x \in [x_0 - \delta, x_0 + \delta]$, tedy $T(g) \in P$.

S využitím **2.5.4.1** dostaneme

$$\begin{aligned} \rho_C(T(g), T(h)) &= \max_{x_0 - \delta \leq x \leq x_0 + \delta} |T(g)(x) - T(h)(x)| = \\ &= \max_{x_0 - \delta \leq x \leq x_0 + \delta} \left| g(x) - \frac{F(x, g(x))}{d} - h(x) + \frac{F(x, h(x))}{d} \right| = \\ &= \max_{x_0 - \delta \leq x \leq x_0 + \delta} \left| g(x) - h(x) - \frac{F_y(x, \xi)(g(x) - h(x))}{d} \right| = \\ &= \max_{x_0 - \delta \leq x \leq x_0 + \delta} |g(x) - h(x)| \left| 1 - \frac{F_y(x, \xi)}{d} \right|. \end{aligned}$$

Přitom ξ leží mezi hodnotami $g(x)$ a $h(x)$, $g, h \in P$, tedy $\xi \in \mathcal{O}_\varepsilon(y_0)$, takže podle **(13.1)** je

$$\rho_C(T(g), T(h)) \leq \frac{1}{2} \max_{x_0 - \delta \leq x \leq x_0 + \delta} |g(x) - h(x)| = \frac{1}{2} \rho_C(g, h),$$

což znamená, že T je kontrakce na P . \square

13.1.3 Poznámka

Jsou-li splněny předpoklady věty **13.1.2**, existuje jediná spojitá funkce f daná implicitně rovnicí $F(x, y) = 0$. Kromě ní může existovat více nespojitých funkcí g , pro něž $F(x, g(x)) = 0$.

Např.: $F(x, y) = y(y - 1)$, $(x_0, y_0) = (0, 0)$

$$f(x) \equiv 0, \quad g_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}, \quad g_2(x) = \chi(x), \dots$$

13.1.4 Věta

Nechť jsou splněny předpoklady věty **13.1.2** a necht' navíc má F na R spojité parciální derivace. Pak funkce $y = f(x)$, která je v okolí bodu (x_0, y_0) implicitně zadána rovnicí $F(x, y) = 0$ má v bodě x_0 derivaci a platí

$$f'(x_0) = -\frac{F_x(x_0, y_0)}{F_y(x_0, y_0)}.$$

D.: $F(x, f(x)) = 0$ na okolí bodu x_0 . Derivováním tohoto vztahu podle x (sr. **12.4.1**) dostaneme

$$F_x(x, f(x)) + F_y(x, f(x))f'(x) = 0.$$

Dosazením x_0 za x a snadnou úpravou dostaneme dokazovaný vztah. \square

13.1.5 Poznámka

Nechť jsou splněny předpoklady věty **13.1.2** a necht' navíc má F na \mathbb{R} spojité druhé parciální derivace. Pak funkce $y = f(x)$, která je v okolí bodu (x_0, y_0) implicitně zadána rovnicí $F(x, y) = 0$ má v bodě x_0 druhou derivaci. Lze ji vypočítat postupem analogickým postupu při důkazu věty **13.1.4**.

Analogicky lze postupovat při výpočtu derivací vyšších řádů.

13.1.6 Definice

Nechť F je funkce tří proměnných, $(x_0, y_0, z_0) \in \mathbb{R}^3$ je takový bod, že $F(x_0, y_0, z_0) = 0$ a $\delta > 0$ je reálné číslo. Řekneme, že funkce $z = f(x, y)$ je na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta) \times (y_0 - \delta, y_0 + \delta)$ zadána implicitně rovnicí $F(x, y, z) = 0$, jestliže pro $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$, $y \in (y_0 - \delta, y_0 + \delta)$ je $F(x, y, f(x, y)) = 0$.

13.1.7 Věta

Nechť F je funkce tří proměnných a jsou splněny předpoklady:

- existuje $(x_0, y_0, z_0) \in \text{Dom } F$, že $F(x_0, y_0, z_0) = 0$,
- existuje $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$, že F je spojitá na množině
 $R = (x_0 - a, x_0 + a) \times (y_0 - a, y_0 + a) \times (z_0 - a, z_0 + a) \cap \text{Dom } F$,
- F má spojitou parciální derivaci podle z v bodě (x_0, y_0, z_0) a platí $\frac{\partial F(x_0, y_0, z_0)}{\partial z} \neq 0$.

Pak existuje kladné číslo δ a jediná spojitá funkce $z = f(x, y)$, která je na $(x_0 - \delta, x_0 + \delta) \times (y_0 - \delta, y_0 + \delta)$ zadána implicitně rovnicí $F(x, y, z) = 0$.

D.: Modifikovaný důkaz věty 13.1.2 \square

13.1.8 Věta

Nechť jsou splněny předpoklady věty 13.1.7 a necht' navíc má F na R spojitě parciální derivace. Pak funkce $z = f(x, y)$, která je v okolí bodu (x_0, y_0, z_0) implicitně zadána rovnicí $F(x, y, z) = 0$ má v bodě (x_0, y_0) parciální derivace a platí

$$f_x(x_0, y_0) = -\frac{F_x(x_0, y_0, z_0)}{F_z(x_0, y_0, z_0)}, \quad f_y(x_0, y_0) = -\frac{F_y(x_0, y_0, z_0)}{F_z(x_0, y_0, z_0)}.$$

D.: Přímým výpočtem jako u 13.1.4 \square

13.1.9 Poznámky

1. Má-li funkce F na R spojitě druhé parciální derivace, pak má i funkce $z = f(x, y)$ v bodě (x_0, y_0) druhé parciální derivace. Lze je vypočítat analogickým postupem. Analogicky lze postupovat při výpočtu derivací vyšších řádů.
2. Analogicky lze definovat implicitně zadanou funkci n proměnných, dokázat její jednoznačnou existenci a počítat její derivace.

13.2 Diferencovatelná zobrazení

Zobrazení $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \mapsto (f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, x_2, \dots, x_n))$$

Zobrazení F je určeno m funkcemi n proměnných f_1, f_2, \dots, f_m . Tyto funkce nazýváme *složky* nebo *souřadnicové funkce* zobrazení F , píšeme $F = (f_1, f_2, \dots, f_m)$.

$\text{Dom } F = \text{Dom } f_1 \times \text{Dom } f_2 \times \dots \times \text{Dom } f_m$.

13.2.1 Poznámka

Zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je spojitě v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in \mathbb{R}^n$ právě tehdy, když všechny funkce f_1, f_2, \dots, f_m jsou spojitě v tomto bodě.

D.: \Rightarrow : Bud' $\varepsilon > 0$ libovolné. K němu existuje $\delta > 0$ takové, že pro každé

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}_\delta(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = (x_1^0 - \delta, x_1^0 + \delta) \times (x_2^0 - \delta, x_2^0 + \delta) \times \dots \times (x_n^0 - \delta, x_n^0 + \delta)$$

platí

$$\begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &\in \mathcal{O}_\varepsilon(f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, x_2, \dots, x_n)) = \\ &= (f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - \varepsilon, f_1(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \varepsilon) \times \\ &\quad \times (f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - \varepsilon, f_2(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \varepsilon) \times \dots \times \\ &\quad \times (f_m(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - \varepsilon, f_m(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \varepsilon). \end{aligned}$$

Jinými slovy: k $\varepsilon > 0$ existuje $\delta > 0$, že pro $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}_\delta(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ je

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \in (f_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - \varepsilon, f_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \varepsilon),$$

tedy f_j je spojitá funkce. To platí pro každé $j \in \{1, 2, \dots, m\}$.

\Leftarrow : K $\varepsilon > 0$ existuje $\delta_j > 0$, že pro $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}_{\delta_j}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ je

$$f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \in (f_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) - \varepsilon, f_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \varepsilon), \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Položíme $\delta = \min\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\}$. Pak pro $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}_\delta(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ je

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{O}_\varepsilon(F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)). \quad \square$$

13.2.2 Definice

Řekneme, že zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je *diferencovatelné v bodě* $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, jestliže každá z funkcí f_1, f_2, \dots, f_m je diferencovatelná v tomto bodě.

Zobrazení $dF(x^0) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ dané předpisem

$$(h_1, h_2, \dots, h_n) \mapsto (df_1(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n), df_2(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n), \dots, df_m(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n))$$

se nazývá *diferenciál zobrazení* F v bodě $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$.

Zobrazení F se nazývá *diferencovatelné*, je-li diferencovatelné v každém bodě z Dom f .

13.2.3 Poznámky

1. Diferenciál zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ je lineární zobrazení určené maticí $A = (a_{ij}) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x^0) \right) = (f'_{i|j}(x^0))$.

D.:

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} df_1(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n) \\ df_2(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n) \\ \vdots \\ df_m(x^0)(h_1, h_2, \dots, h_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_1}{\partial x_k}(x^0) h_k \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_2}{\partial x_k}(x^0) h_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_m}{\partial x_k}(x^0) h_k \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} \quad \square$$

2. Je-li $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funkce n proměnných diferencovatelná v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, pak se podle [12.3.5.3](#) v okolí bodu x^0 „její přírůstek chová jako lineární funkce $df(x^0)$ “, $f(x) = f(x^0) \approx df(x^0)(x - x^0)$.
Je-li tedy $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ zobrazení diferencovatelné v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, pak pro x z okolí bodu x^0 platí

$$\begin{aligned} F(x) - F(x^0) &= \begin{pmatrix} f_1(x) - f_1(x^0) \\ f_2(x) - f_2(x^0) \\ \vdots \\ f_m(x) - f_m(x^0) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} df_1(x^0)(x - x^0) \\ df_2(x^0)(x - x^0) \\ \vdots \\ df_m(x^0)(x - x^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_1}{\partial x_k}(x^0)(x_k - x_k^0) \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_2}{\partial x_k}(x^0)(x_k - x_k^0) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_m}{\partial x_k}(x^0)(x_k - x_k^0) \end{pmatrix} = \\ &= \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x^0) \right) \cdot (x - x^0) = dF(x^0)(x - x^0). \end{aligned}$$

13.2.4 Definice

Nechť zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je diferencovatelné v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. Matice

$$F'(x^0) = (f'_{i|j}(x^0)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x^0) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x^0) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x^0) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(x^0) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(x^0) & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(x^0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x^0) & \frac{\partial f_m}{\partial x_2}(x^0) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x^0) \end{pmatrix}$$

se nazývá *Jacobiho matice zobrazení F v bodě x^0* (derivace zobrazení F v bodě x^0).

Je-li $n = m$ pak se determinant Jacobiho matice zobrazení F v bodě x^0 nazývá *Jacobián* (*Jacobiho determinant*) zobrazení F v bodě x^0 . Označuje se

$$J(F(x^0)), \frac{D(f_1, f_2, \dots, f_n)}{D(x_1, x_2, \dots, x_n)}(x^0), \frac{\partial(f_1, f_2, \dots, f_n)}{\partial(x_1, x_2, \dots, x_n)}(x^0).$$

13.2.5 Poznámka

Je-li $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ diferencovatelné zobrazení, pak zobrazení $x \mapsto F'(x)$ je zobrazením $\text{Dom } F$ do množiny matic typu $m \times n$. Značíme ho F' .

Je-li $F = (f_1, f_2, \dots, f_n) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ diferencovatelné zobrazení, pak zobrazení $x \mapsto J(F(x))$ je funkcí n proměnných.

13.2.6 Věta (o derivaci složeného zobrazení)

Nechť $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $G = (g_1, g_2, \dots, g_p) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^p$ jsou diferencovatelná zobrazení. Pak složené zobrazení $H = (h_1, h_2, \dots, h_n) = G \circ F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ je také diferencovatelné a pro jeho Jacobiho matici platí

$$H'(x_1, x_2, \dots, x_n) = G'(F(x_1, x_2, \dots, x_n)) \cdot F'(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Je-li $n = m = p$, pak při označení $(y_1, y_2, \dots, y_m) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ pro Jacobiány zobrazení F , G , H platí

$$J(H(x_1, x_2, \dots, x_n)) = J(G(y_1, y_2, \dots, y_m))J(F(x_1, x_2, \dots, x_n)).$$

D.: $h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = g_i(f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, x_2, \dots, x_n))$.

Podle 12.4.1 je

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_i}{\partial x_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \\ &= \sum_{k=1}^p g'_{i|k}(f_1((x_1, x_2, \dots, x_n), f_2((x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, x_2, \dots, x_n)))f'_{k|j}(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

pro $i = 1, 2, \dots, p$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Druhé tvrzení plyne z věty o determinantu součinu matic. \square

13.2.7 Věta (o lokální inverzi)

Nechť zobrazení $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je diferencovatelné v bodě $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ a $F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_n^0)$. Je-li Jacobiho matice $F'(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ regulární (tj. $\det F'(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = J(F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)) \neq 0$), pak existuje okolí $\mathcal{O}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ bodu $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, v němž je zobrazení F prosté, tedy existuje inverzní zobrazení $F^{-1} : F(\mathcal{O}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)) \rightarrow \mathbb{R}^n$. Inverzní zobrazení F^{-1} je diferencovatelné v bodě $(y_1^0, y_2^0, \dots, y_n^0)$ a pro jeho Jacobiho matici platí

$$(F^{-1})'(y_1^0, y_2^0, \dots, y_n^0) = (F'(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0))^{-1}.$$

Náznak důkazu: Pokud $F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) = 0$ tak na $\mathcal{O}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ platí

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx dF(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)(x_1 - x_1^0, x_2 - x_2^0, \dots, x_n - x_n^0).$$

Lineární zobrazení na pravé straně přibližné rovnosti je prosté právě tehdy, když jeho matice, tj. Jacobiho matice zobrazení F , je regulární.

Jacobiho matice identického zobrazení $F^{-1} \circ F$, $F^{-1} \circ F(x_1, x_2, \dots, x_n) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ je jednotková matice E .

Podle 13.2.6 platí $E = (F^{-1})'(F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)) \cdot F'(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, z čehož bezprostředně plyne dokazovaný vztah. \square

13.2.8 Definice

Řekneme, že zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je třídy C^k , $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ v bodě $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, jestliže každá z funkcí f_1, f_2, \dots, f_m je třídy C^k v bodě x^0 .

Řekneme, že zobrazení $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ je třídy C^k , $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$, jestliže je třídy C^k v každém bodě $\text{Dom } F$.

Poznámka: Je-li zobrazení F třídy C^k , pak $\text{Dom } F$ je otevřená množina.

13.2.9 Poznámka

Řekneme, že matice A o n sloupcích a m řádcích je *regulární* (v zobecněném smyslu), jestliže její hodnost je rovna $\min\{m, n\}$, tj. má-li maximální hodnost.

Tedy je-li $m = n$, $\det A \neq 0$ (jak je obvyklé v lineární algebře)

$n > m$, řádky matice A jsou lineárně nezávislé

$n < m$, sloupce matice A jsou lineárně nezávislé

Je-li $n < m$ a matice A je regulární, pak lineární zobrazení $\Phi : V_n \rightarrow V_m$, $\Phi(\vec{v}) = A \cdot \vec{v}$ je prosté. Kdyby totiž existovaly vektory $\vec{u}, \vec{v} \in V_n$ takové, že $\vec{u} \neq \vec{v}$ a $\Phi(\vec{u}) = \Phi(\vec{v})$, pak by

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \Phi(\vec{u}) - \Phi(\vec{v}) = \Phi(\vec{u} - \vec{v}) = A \cdot (\vec{u} - \vec{v}).$$

Jinými slovy, existovala by lineární kombinace sloupců matice A s koeficienty, které by nebyly všechny nulové, rovnající se nulovému vektoru, což by znamenalo, že sloupce matice A nejsou lineárně nezávislé a to by byl spor.

13.2.10 Definice

Buď $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ zobrazení. Řekneme, že zobrazení F je *regulární*, jestliže je třídy C^1 a pro každé $x \in \text{Dom } F$ je matice $F'(x)$ regulární.

Poznámka: Je-li zobrazení $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ regulární a $n < m$, pak ke každému bodu $x \in \text{Dom } F$ existuje okolí $\mathcal{O}(x) \subseteq \text{Dom } F$ takové, že F je na $\mathcal{O}(x)$ prosté.

Zdůvodnění plyne z 13.2.3.2 a z 13.2.9.

13.2.11 Věta (o implicitním zobrazení)

Nechť $F = (f_1, f_2, \dots, f_m) : \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{R}^m$ je zobrazení, které splňuje předpoklady

- existuje bod $(x^0, y^0) = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0) \in \text{Dom } F$ takový, že $F(x^0, y^0) = 0$,
- existuje okolí $\mathcal{O}_a(x^0, y^0)$ bodu $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0)$ takové, že F je spojitě na $\mathcal{O}_a(x^0, y^0) \cap \text{Dom } F$,

- všechny prvky matice

$$F_y(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1}(x, y) & \frac{\partial f_1}{\partial y_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m}(x, y) \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1}(x, y) & \frac{\partial f_2}{\partial y_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_m}(x, y) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial y_1}(x, y) & \frac{\partial f_m}{\partial y_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial y_m}(x, y) \end{pmatrix}$$

jsou spojité v bodě (x^0, y^0) a platí $\det F_y(x^0, y^0) \neq 0$.

Pak existuje okolí $\mathcal{O}_\delta(x^0)$ bodu $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ v \mathbb{R}^n a jediné spojité zobrazení $G : \mathcal{O}_\delta(x^0) \rightarrow \mathbb{R}^m$ takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}_\delta(x^0)$ je $F(x, G(x)) = 0$.

Jsou-li navíc v bodě (x^0, y^0) spojité všechny prvky matice

$$F_x(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x, y) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x, y) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(x, y) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}(x, y) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x, y) & \frac{\partial f_m}{\partial x_2}(x, y) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x, y) \end{pmatrix},$$

pak je zobrazení G diferencovatelné v bodě x^0 a pro jeho Jacobiho matici platí

$$G'(x^0) = -(F_y(x^0, y^0))^{-1} \cdot F_x(x^0, y^0).$$

Náznak důkazu: První tvrzení v podstatě říká, že za uvedených předpokladů lze z rovnice $F(x, y) = 0$ vypočítat $y = G(x)$.

Je-li F diferencovatelné v bodě (x^0, y^0) , pak podle 13.2.3.2 je

$$\begin{aligned} 0 &= F(x, y) \approx dF(x^0)(x - x^0, y - y^0) = \\ &= \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_1}{\partial x_k}(x^0, y^0)(x_k - x_k^0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_1}{\partial y_j}(x^0, y^0)(y_j - y_j^0) \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_2}{\partial x_k}(x^0, y^0)(x_k - x_k^0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_2}{\partial y_j}(x^0, y^0)(y_j - y_j^0) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_m}{\partial x_k}(x^0, y^0)(x_k - x_k^0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_m}{\partial y_j}(x^0, y^0)(y_j - y_j^0) \end{pmatrix} = \\ &= F_x(x^0, y^0) \cdot (x - x^0) + F_y(x^0, y^0) \cdot (y - y^0). \end{aligned}$$

Z předpokladu $\det F_y(x^0, y^0) \neq 0$ plyne existence $(F_y(x^0, y^0))^{-1}$ a z přibližné rovnosti $0 \approx F_x(x^0, y^0) \cdot (x - x^0) + F_y(x^0, y^0)(y - y^0)$ plyne přibližná rovnost

$$y - y^0 \approx -(F_y(x^0, y^0))^{-1} \cdot (F_x(x^0, y^0) \cdot (x - x^0)) = -(F_y(x^0, y^0))^{-1} \cdot F_x(x^0, y^0) \cdot (x - x^0),$$

neboli

$$y \approx y^0 + -(F_y(x^0, y^0))^{-1} \cdot F_x(x^0, y^0) \cdot (x - x^0).$$

Takže y lze z rovnice $F(x, y)$ přibližně vypočítat.
Současně

$$y = G(x) \approx y^0 + dG(x^0)(x - x^0) = G'(x^0) \cdot (x - x^0),$$

takže Jacobiho matice zobrazení G v bodě x^0 je dána vzorcem z druhého tvrzení věty.

Přesný důkaz lze provést precizací uvedené myšlenky pomocí příslušných limitních přechodů.

Jiná metoda důkazu spočívá ve „vícerozměrné modifikaci“ důkazu věty 13.1.2. \square

13.3 Diferencovatelné variety

13.3.1 Definice

Buďte $m, n \in \mathbb{N}$, $1 \leq m \leq n$. Řekneme, že množina $M \subseteq \mathbb{R}^n$ je m -rozměrná nadplocha v n -rozměrném prostoru, jestliže ke každému $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in M$ existuje jeho okolí $\mathcal{O}(y)$ v \mathbb{R}^n , otevřená množina $U_y \subseteq \mathbb{R}^m$ a prosté spojitě zobrazení $F_y : U_y \rightarrow \mathbb{R}^n$ tak, že $y \in F_y(U_y) = \mathcal{O}(y) \cap M$.

Je-li každé ze zobrazení F_y , $y \in M$ navíc regulární, řekneme, že M je m -rozměrná (diferencovatelná) varieta v n -rozměrném prostoru.

Je-li každé z regulárních zobrazení F_y , $y \in M$ navíc třídy C^k , řekneme, že M je m -rozměrná varieta třídy C^k v n -rozměrném prostoru.

- n -rozměrné nadplochy (variety) v n -rozměrném prostoru jsou otevřené množiny.
- Jednorozměrné nadplochy se nazývají *křivky*, dvourozměrné nadplochy se nazývají *plochy*.
- Jednorozměrné variety se nazývají hladké křivky, dvourozměrné variety se nazývají hladké plochy.

Poznamenejme, že hladká jordanovská křivka definovaná v 3.2.6 a hladký oblouk $\{(\varphi(t), \psi(t)) : t \in I\}$, kde I je otevřený interval jsou hladkými křivkami v právě uvedeném smyslu. Definice 3.2.6 je však poněkud obecnější, zahrnuje i oblouky s jedním nebo oběma krajními body.

13.3.2 Věta

Buďte g_1, g_2, \dots, g_k diferencovatelné funkce n proměnných, $n > k$. Položme

$$M = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \text{Dom } g_1 \cap \text{Dom } g_2 \cap \dots \cap \text{Dom } g_k :$$

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \dots = g_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0\}.$$

Jestliže v každém bodě $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in M$ je hodnota matice

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial g_1}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n}(x) \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial g_2}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n}(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial x_1}(x) & \frac{\partial g_k}{\partial x_2}(x) & \dots & \frac{\partial g_k}{\partial x_n}(x) \end{pmatrix}$$

rovna k , pak množina M je $(n - k)$ -rozměrnou diferencovatelnou varietou.

D.: Buď $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in M$. Poněvadž matice

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(\hat{x}) & \frac{\partial g_1}{\partial x_2}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n}(\hat{x}) \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1}(\hat{x}) & \frac{\partial g_2}{\partial x_2}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n}(\hat{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial x_1}(\hat{x}) & \frac{\partial g_k}{\partial x_2}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_k}{\partial x_n}(\hat{x}) \end{pmatrix}$$

je regulární, existují vesměs různé indexy $j_1, j_2, \dots, j_k \in \{1, 2, \dots, n\}$ takové, že matice

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_{j_1}}(\hat{x}) & \frac{\partial g_1}{\partial x_{j_2}}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{j_k}}(\hat{x}) \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_{j_1}}(\hat{x}) & \frac{\partial g_2}{\partial x_{j_2}}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_{j_k}}(\hat{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_k}{\partial x_{j_1}}(\hat{x}) & \frac{\partial g_k}{\partial x_{j_2}}(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial g_k}{\partial x_{j_k}}(\hat{x}) \end{pmatrix}$$

je regulární. Označíme-li i_1, i_2, \dots, i_{n-k} vesměs různé indexy z $\{1, 2, \dots, n\} \setminus \{j_1, j_2, \dots, j_k\}$, $x = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n-k}})$, $y = (x_{j_1}, x_{j_2}, \dots, x_{j_k})$, pak jsou splněny předpoklady 13.2.11. Existuje tedy otevřená množina $U_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)} = \mathcal{O}(\hat{x}) \subseteq \mathbb{R}^{n-k}$ a zobrazení $\varphi_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)} : \mathcal{O}(\hat{x}) \rightarrow \mathcal{O}(\hat{y}) \subseteq \mathbb{R}^k$ takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(x)$ je $(x, \varphi_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}(x)) \in M$. Položíme $F_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}(x) = (x, \varphi_{(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}(x))$. Stejnou konstrukci lze provést v každém bodě z M . \square

Řekneme, že varieta M z věty 13.3.2 je zadána rovnicemi $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$.

13.3.3 Heuristická úvaha

Buď g diferencovatelná funkce dvou proměnných. Pak $M = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : g(x, y) = 0\}$ je jednorozměrná diferencovatelná varieta (hladká křivka). Buď $(\hat{x}, \hat{y}) \in M$ takový, že $\frac{\partial g}{\partial y} \neq 0$. Pak podle 13.1.2 existuje funkce $y = y(x)$ taková, že v okolí \hat{x} její graf splývá s M . Tečna ke grafu funkce $y(x)$ v bodě (\hat{x}, \hat{y}) je dána rovnicí

$$y - \hat{y} = y'(\hat{x})(x - \hat{x}).$$

Přitom $y'(\hat{x}) = -\frac{g_x(\hat{x}, \hat{y})}{g_y(\hat{x}, \hat{y})}$, takže obecná rovnice tečny je

$$g_x(\hat{x}, \hat{y})x + g_y(\hat{x}, \hat{y})y - g_x(\hat{x}, \hat{y})\hat{x} - g_y(\hat{x}, \hat{y})\hat{y} = 0.$$

Normálový vektor ke grafu funkce $y(x)$ v bodě (\hat{x}, \hat{y}) tedy je $(g_x(\hat{x}, \hat{y}), g_y(\hat{x}, \hat{y})) = \text{grad } g(\hat{x}, \hat{y}) = g'(\hat{x}, \hat{y})$. Tečný vektor ke křivce M v bodě (\hat{x}, \hat{y}) je tedy kolmý k vektoru $\text{grad } g(\hat{x}, \hat{y})$.

13.3.4 Pojmy z lineární algebry

Nechť V_n je n -rozměrný unitární prostor (vektorový prostor se skalárním součinem) a $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_m \in V_n$. Označme $\text{Lin}(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_m)$ podprostor prostoru V_n generovaný vektory $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_m$ (lineární obal množiny vektorů $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_m\}$).

Je-li $W \subseteq V_n$ vektorový podprostor, označme W^\perp jeho ortogonální doplněk (vektorový podprostor, jehož každý prvek je kolmý k libovolnému prvku z W), tzn. je-li $\vec{u} \in W$ a $\vec{v} \in W^\perp$, pak $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$.

13.3.5 Definice

Nechť funkce g_1, g_2, \dots, g_k splňují předpoklady 13.3.2, M je diferencovatelná varieta zadaná rovnicemi $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$ a nechť $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in M$. Vektorový prostor

$$\mathcal{N}_M(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \text{Lin}(g'_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), g'_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), \dots, g'_k(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n))$$

nazýváme *normálový prostor k M v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$* .

Vektorový prostor

$$\mathcal{T}_M(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = (\mathcal{N}_M(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n))^\perp$$

nazýváme *tečný prostor k M v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$* .

13.3.6 Věta

Buď M diferencovatelná varieta zadaná rovnicemi $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$ a necht $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in M$ je pevně zvolený bod, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in M$ je libovolný.

Pak existuje vektor $\vec{h} \in \mathcal{T}_M(\hat{x})$, $\alpha \in \mathbb{R}$ a zobrazení $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ takové, že $x - \hat{x} = \alpha \vec{h} + \Phi(\alpha)$ a $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\Phi(\tau)}{\tau} = \vec{o}$ (nulový vektor).

D.: Libovolný vektor $\vec{r} \in V_n$ lze vyjádřit ve tvaru $\vec{r} = \vec{p} + \vec{q}$, kde $\vec{p} \in \mathcal{T}_M(\hat{x})$, $\vec{q} \in \mathcal{T}_M(\hat{x})^\perp = \mathcal{N}_M(\hat{x})$. Tedy také $x - \hat{x} = \vec{u} + \vec{w}$, kde $\vec{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in \mathcal{T}_M(\hat{x})$, $\vec{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \in \mathcal{N}_M(\hat{x})$.

Položme $\alpha = \|x - \hat{x}\|$ a pro $\alpha \neq 0$ položme $\vec{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n) = \frac{\vec{u}}{\alpha}$, tedy $\vec{u} = \alpha \vec{h}$.

Dále označme $\Phi(\alpha) = (\varphi_1(\alpha), \varphi_2(\alpha), \dots, \varphi_n(\alpha)) = (w_1, w_2, \dots, w_n)$.

Je-li $\alpha = 0$, pak $x = \hat{x}$, $\vec{u} = \vec{w} = \vec{o}$ a tedy $\Phi(0) = \vec{o}$.

Necht vektory $\vec{v}^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_n^j)$, $j = 1, 2, \dots, n - k$ tvoří bázi tečného prostoru $\mathcal{T}_M(\hat{x})$. Poněvadž $\hat{x} = x - \vec{u} - \vec{w} = x - \alpha \vec{h} - \Phi(\alpha) \in M$ a $\Phi(\alpha) \perp \vec{v}^j$ pro každé $j = 1, 2, \dots, n - k$, musí $\varphi_1(\alpha), \varphi_2(\alpha), \dots, \varphi_n(\alpha)$ splňovat systém rovnic

$$\begin{aligned} g_i(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1(\alpha), x_2 - \alpha h_2 - \varphi_2(\alpha), \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n(\alpha)) &= 0, & i = 1, 2, \dots, k \\ v_1^j \varphi_1(\alpha) + v_2^j \varphi_2(\alpha) + \dots + v_n^j \varphi_n(\alpha) &= 0, & j = 1, 2, \dots, n - k \end{aligned} \quad (13.3)$$

Levou stranu tohoto systému lze považovat za zobrazení $G : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$, jímž zobrazujeme $(n + 1)$ -tice čísel $(\alpha, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$.

Budeme aplikovat větu o implicitním zobrazení 13.2.11 a používat označení v ní zavedené.

$$G_\Phi(\alpha, \varphi_1, \dots, \varphi_n) =$$

$$= \begin{pmatrix} -\frac{\partial g_1}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) & \dots & -\frac{\partial g_1}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) \\ -\frac{\partial g_2}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) & \dots & -\frac{\partial g_2}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{\partial g_k}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) & \dots & -\frac{\partial g_k}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) \\ v_1^1 & \dots & v_n^1 \\ v_1^2 & \dots & v_n^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_1^{n-k} & \dots & v_n^{n-k} \end{pmatrix}.$$

Prvních k řádků této matice je lineárně nezávislých podle 13.3.2, posledních $n - k$ řádků je také lineárně nezávislých, neboť vektory $\vec{v}^1, \vec{v}^2, \dots, \vec{v}^{n-k}$ tvoří bázi vektorového podprostoru. Libovolný z posledních $n - k$ řádků je lineárně nezávislý na libovolné lineární kombinaci prvních k řádků, neboť je to vektor ortogonální k libovolnému z nich. Podobně libovolný z prvních k řádků je lineárně nezávislý na libovolné lineární kombinaci posledních $n - k$ řádků. Matice G_Φ je tedy regulární, jsou splněny předpoklady věty 13.2.11, takže $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ lze ze soustavy rovnic (13.3) vyjádřit jako funkce proměnné α .

Máme tedy definováno zobrazení $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ takové, že $\Phi(0) = \vec{o}$.

Dále platí

$$G_\alpha(\alpha, \varphi_1, \dots, \varphi_n) =$$

$$= \begin{pmatrix} -h_1 \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) - \dots - h_n \frac{\partial g_1}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi) \\ -h_1 \frac{\partial g_2}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) - \dots - h_n \frac{\partial g_2}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi) \\ \vdots \\ -h_1 \frac{\partial g_k}{\partial x_1}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi_n) - \dots - h_n \frac{\partial g_k}{\partial x_n}(x_1 - \alpha h_1 - \varphi_1, \dots, x_n - \alpha h_n - \varphi) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix},$$

takže

$$G_\alpha(0, \varphi_1, \dots, \varphi_n) = \left(-\vec{h} \cdot g'_1(\hat{x}), -\vec{h} \cdot g'_2(\hat{x}), \dots, -\vec{h} \cdot g'_k(\hat{x}), 0, 0, \dots, 0 \right)^T = \vec{o},$$

neboť vektory \vec{h} a $g'_i(\hat{x})$ jsou kolmé pro jakékoliv $i \in \{1, 2, \dots, k\}$.

Odtud podle 13.2.11 plyne, že $\varphi'_1(0) = \varphi'_2(0) = \dots = \varphi'_n(0) = 0$ a dále podle 2.5.6

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\varphi_j(\tau)}{\tau} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad \square$$

13.4 Vázané extrém

13.4.1 Definice

Buď $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $M \subseteq \text{Dom } f$. Řekneme, že funkce f nabývá v bodě $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in M$ lokálního maxima (resp. minima) vzhledem k množině M , jestliže existuje okolí $\mathcal{O}(\hat{x})$ bodu x takové, že pro každé $x \in \mathcal{O}(\hat{x}) \cap M$ platí $f(x) \leq f(\hat{x})$ (resp. $f(x) \geq f(\hat{x})$).

Jsou-li nerovnosti pro $x \neq \hat{x}$ ostré, mluvíme o ostrém lokálním maximu (resp. minimu) vzhledem k množině M . (Ostrá) lokální maxima a minima nazýváme souhrnně (ostré) lokální extrém vzhledem k množině M .

Nechť f, g_1, g_2, \dots, g_m jsou funkce n proměnných třídy C^1 , $m < n$. Úlohu: najít lokální extrém funkce f vzhledem k diferencovatelné varietě zadané rovnicemi $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, $n = 1, 2, \dots, m$, tj.

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &\rightarrow \text{extrém} \\ g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \tag{13.4}$$

nazýváme konečnědimenzionální hladkou extremální úlohou s omezeními typu rovnosti. Stručně úlohou na vázaný (podmíněný) extrém.

13.4.2 Definice

Funkci $\mathcal{L} : \mathbb{R}^{n+m+1} \rightarrow \mathbb{R}$ danou předpisem

$$\mathcal{L}(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \lambda_0 f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{k=1}^m \lambda_k g_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

nazýváme Lagrangeovou funkcí úlohy (13.4), čísla $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m$ nazýváme Lagrangeovy multiplifikátory.

13.4.3 Věta (Lagrange 1797)

Je-li $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ řešením úlohy (13.4), pak existují Lagrangeovy multiplikátory $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m$, z nichž alespoň jeden je nenulový tak, že

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \dots = \frac{\partial}{\partial x_n} \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = 0. \quad (13.5)$$

D.: Necht \hat{x} je bodem lokálního minima úlohy (13.4).

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \lambda_0 \frac{\partial}{\partial x_j} f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial}{\partial x_j} g_k(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n),$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Podmínka (13.5) má tedy ve vektorovém zápisu tvar

$$\lambda_0 f'(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + \sum_{k=1}^m \lambda_k g'_k(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \vec{0}.$$

Připustíme, že vektory $f'(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), g'_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), g'_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), \dots, g'_m(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ jsou lineárně nezávislé.

Uvažujme zobrazení $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m+1}$ dané předpisem $F(x) = \begin{pmatrix} f(x) - f(\hat{x}) \\ g_1(x) \\ g_2(x) \\ \vdots \\ g_m(x) \end{pmatrix}$.

Podle našeho předpokladu je hodnost matice

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} f(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} f(\hat{x}) \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_1(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_1(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} g_1(\hat{x}) \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_2(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_2(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} g_2(\hat{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_m(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_m(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_n} g_m(\hat{x}) \end{pmatrix}$$

rovna $m + 1$. Bez újmy na obecnosti lze předpokládat, že proměnné jsou očíslovány tak, že

$$\det \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} f(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_{m+1}} f(\hat{x}) \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_1(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_1(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_{m+1}} g_1(\hat{x}) \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_2(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_2(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_{m+1}} g_2(\hat{x}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_1} g_m(\hat{x}) & \frac{\partial}{\partial x_2} g_m(\hat{x}) & \dots & \frac{\partial}{\partial x_{m+1}} g_m(\hat{x}) \end{pmatrix} \neq 0.$$

To znamená, že zobrazení $G : \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow \mathbb{R}^{m+1}$ dané předpisem

$$G(x_1, x_2, \dots, x_{m+1}) = \begin{pmatrix} f(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \\ g_1(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) \end{pmatrix}$$

splňuje předpoklady 13.2.7. Odtud plyne, že ke každému dostatečně malému $\varepsilon > 0$ existují $x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon)$ takové, že

$$\begin{aligned} f(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= -\varepsilon \\ g_1(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) &= 0 \\ g_2(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) &= 0 \\ &\vdots \\ g_m(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) &= 0. \end{aligned}$$

Našli jsme tedy bod $(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) \in \mathcal{O}(\hat{x}) \cap M$ takový že $f(x_1(\varepsilon), x_2(\varepsilon), \dots, x_{m+1}(\varepsilon), \hat{x}_{m+2}, \hat{x}_{m+3}, \dots, \hat{x}_n) = f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) - \varepsilon < f(\hat{x})$, což znamená, že \hat{x} není bodem lokálního minima úlohy (13.4) a to je spor.

Vektory $f'(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), g'_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), g'_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n), \dots, g'_m(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ jsou tedy lineárně závislé, z čehož plyne tvrzení věty.

Pro lokální minimum se důkaz provede analogicky. \square

13.4.4 Poznámky

1. Věta 13.4.3 poskytuje návod na vyhledání bodu „podezřelého z toho“, že v něm může mít úloha (13.4) lokální extrém: Řešíme soustavu $n + m$ rovnic

$$\begin{aligned} \lambda_0 \frac{\partial}{\partial x_i} f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial}{\partial x_i} g_k(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ g_j(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (13.6)$$

pro $n + m + 1$ neznámých $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m$. Má-li tato soustava řešení takové, že $\lambda_l \neq 0$ pro nějaké $l \in \{0, 1, \dots, m\}$, pak $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ je bod, v němž úloha (13.4) může mít lokální extrém.

Soustava rovnic (13.6) je pro Lagrangeovy multiplikátory $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m$ lineární. To znamená, že multiplikátory jsou určeny jednoznačně až na nenulovou multiplikativní konstantu. Stačí tedy položit $\lambda_l = 1$ a řešit $n + m$ rovnic pro $n + m$ neznámých.

2. λ_0 nemusí být nenulový.

Uvažujme například úlohu najít lokální extrém funkce $f(x, y) = x$ za podmínky $g(x, y) = x^2 + y^2 = 0$. Pak $(\hat{x}, \hat{y}) = (0, 0)$ je řešením této úlohy (neboť je to jediný bod vyhovující podmínce).

Kdyby $\lambda_0 = 1$, pak by $\mathcal{L}(x, y, 1, \lambda) = x + \lambda(x^2 + y^2)$ a systém rovnic (13.5) by měl tvar

$$\begin{aligned} 1 + 2\lambda\hat{x} &= 0, \\ 2\lambda\hat{y} &= 0. \end{aligned}$$

Z první rovnice dostaneme $\lambda \neq 0$, potom $\hat{x} = -\frac{1}{2\lambda}$ a ze druhé rovnice $\hat{y} = 0$. Pak ale $\hat{x}^2 + \hat{y}^2 = \frac{1}{4\lambda^2} \neq 0$.

3. Jsou-li vektory $g'_1(\hat{x}), g'_2(\hat{x}), \dots, g'_m(\hat{x})$ lineárně nezávislé, pak $\lambda_0 \neq 0$ a tedy lze položit $\lambda_0 = 1$.

(Toto tvrzení plyne z důkazu věty 13.4.3)

4. Geometrický význam podmínky (13.5) pro případ $n = 2, m = 1$ a rovnicí $g(x, y) = 0$ je určena hladká křivka:

Podle předchozí poznámky je $\lambda_0 \neq 0$ a tedy $f'(\hat{x}, \hat{y}) = -\frac{\lambda_1}{\lambda_0} g'(\hat{x}, \hat{y})$, což znamená, že vektory $f'(\hat{x}, \hat{y})$ (směr nejrychlejšího růstu funkce f v bodě (\hat{x}, \hat{y})) a $g'(\hat{x}, \hat{y})$ (směr normály ke křivce dané rovnicí $g(x, y) = 0$ v bodě (\hat{x}, \hat{y})) jsou rovnoběžné.

13.4.5 Věta

Nechť $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \in M$, $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_0 = 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m$ splňují (13.5) a nechť funkce f, g_1, g_2, \dots, g_m jsou třídy C^2 v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$. Označme $\mathcal{L}'' = \left(\frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j} \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \right)$. (\mathcal{L}'' je čtvercová

matice řádu n .)

Jestliže pro každý vektor $\vec{h} \in \mathcal{T}_m(\hat{x})$ platí $\vec{h}^T \cdot \mathcal{L}'' \cdot \vec{h} > 0$ (resp. $\vec{h}^T \cdot \mathcal{L}'' \cdot \vec{h} < 0$), pak v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ nabývá funkce f lokálního minima (resp. maxima) vzhledem k množině M .

Jestliže existují vektory $\vec{h}, \vec{k} \in \mathcal{T}_m(\hat{x})$ takové, že $\vec{h}^T \cdot \mathcal{L}'' \cdot \vec{h} < 0 < \vec{k}^T \cdot \mathcal{L}'' \cdot \vec{k}$, pak v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ funkce f lokálního extrému vzhledem k množině M nenabývá.

Náznak důkazu: Podle 13.3.6 lze vektor $x - \hat{x}$ pro libovolný bod $x \in m$ vyjádřit ve tvaru $x - \hat{x} = \alpha \vec{h} + \Phi(\alpha)$, kde \vec{h} je jednotkový vektor z $\mathcal{T}_m(\hat{x})$ a $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\Phi(\alpha)}{\alpha} = 0$.

Pro každý bod $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in M$ je $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathcal{L}(x_1, x_2, \dots, x_n, 1, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$.

Funkci $\mathcal{L}(x_1, x_2, \dots, x_n, 1, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ budeme považovat za funkci n proměnných x_1, x_2, \dots, x_n . Poněvadž platí (13.5), je $d\mathcal{L}(x, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = 0$ a tedy s využitím 12.4.3 pro $x \in M$ platí:

$$\begin{aligned} f(x) &= \mathcal{L}(x, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \mathcal{L}(\hat{x}, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) + \frac{1}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(x - \hat{x}) = \\ &= f(\hat{x}) + \frac{1}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(\alpha \vec{h} + \Phi(\alpha)) = \\ &= f(\hat{x}) + \frac{\alpha^2}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(\vec{h}) + \frac{1}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(\Phi(\alpha)). \end{aligned}$$

Tedy

$$f(x) - f(\hat{x}) = \frac{\alpha^2}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(\vec{h}) + \frac{1}{2!} d^2 \mathcal{L}(x + \vartheta(x - \hat{x}), 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m)(\Phi(\alpha)).$$

Druhý sčítanec na pravé straně je v absolutní hodnotě malý pro malé α , znaménko prvního sčítance je pro x dostatečně blízké \hat{x} stejné, jako znaménko výrazu $\vec{h}^T \cdot \mathcal{L}'' \cdot \vec{h}$. \square

13.4.6 Poznámka

Z vět 13.4.3 a 13.4.5 plyne návod na řešení úlohy (13.4) v případě, že vektory $g'_1(x), g'_2(x), \dots, g'_m(x)$ jsou lineárně nezávislé pro jakékoli $x \in \mathbb{R}^n$:

(i) Vytvoříme Lagrangeovu funkci

$$\mathcal{L}(x_1, x_2, \dots, x_n, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{k=1}^m \lambda_k g_k(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

(ii) Najdeme $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m$ jako řešení soustavy rovnic

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, 1, \lambda_1, \dots, \lambda_m) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ g_k(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

(iii) Ze systému lineárních rovnic

$$\frac{\partial g_k(\hat{x})}{\partial x_1} h_1 + \frac{\partial g_k(\hat{x})}{\partial x_2} h_2 + \dots + \frac{\partial g_k(\hat{x})}{\partial x_n} h_n = 0, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

vypočteme m z proměnných h_1, h_2, \dots, h_n v závislosti na $n - m$ zbývajících.

(iv) Vypočítáme druhý diferenciál Lagrangeovy funkce

$$d^2 \mathcal{L}(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n, 1, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)(h_1, h_2, \dots, h_n),$$

přičemž (h_1, h_2, \dots, h_n) je vektor vypočítaný v předchozím kroku a určíme jeho znaménko. Je-li kladné, nastává v bodě $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ lokální minimum úlohy (13.4), je-li záporné, pak maximum.

13.5 Cvičení

- 1) dokažte, že rovnice $x^4 - xy + y^4 = 1$ vyjadřuje v okolí bodu $(0, 1)$ jistou funkci $y = y(x)$. Zjistěte, zda je tato funkce v bodě 0 konvexní nebo konkávní.
- 2) Vyšetřete průběh funkce $y = y(x)$ dané implicitně rovnicí $(x^2 + y^2)^2 = x^2 - y^2$.
Vypočítejte druhý diferenciál funkce $z = z(x, y)$, dané implicitně, v obecném bodě
- 3) $\frac{x}{z} = \ln \frac{z}{y} + 1$, 4) $xyz = x + y + z$.
- Najděte lokální extrémy funkce $z = z(x, y)$ dané implicitně rovnicí
- 5) $x^2 + y^2 + z^2 - xz - yz + 2x + 2y + 2z = 2$, 6) $x^2 + y^2 + z^2 = a^2$.
- 7) Napište rovnici tečny ke kružnici, která je průnikem roviny $x + y + z = 0$ se sférou $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, v bodě $\left(\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{6}}{6}, -\frac{\sqrt{6}}{3}\right)$.
- 8) Najděte extrémní vzdálenosti počátku souřadnic od bodů křivky dané rovnicí $5x^2 + 6xy + 5y^2 = 8$.

- Výsledky:** 1) konkávní 2) Bernoulliho lemniskáta 3) $\frac{-z^2(ydx - xdy)^2}{y^2(x+z)^3}$
- 4) $\frac{2}{(1-xy)^2} (y(yz-1)dx^2 + 2zxdxdy + x(xz-1)dy^2)$
 - 5) $z_{\min} = z(-3 - \sqrt{6}, -3 - \sqrt{6}) = -4 - 2\sqrt{6}$, $z_{\max} = z(-3 + \sqrt{6}, -3 + \sqrt{6}) = -4 + 2\sqrt{6}$
 - 6) $z_{\min} = z(0, 0) = -a$, $z_{\max} = z(0, 0) = a$. 7) $x = \frac{\sqrt{6}}{6} + t$, $y = \frac{\sqrt{6}}{6} - t$, $z = -\frac{\sqrt{6}}{3}$ 8) Nejmenší vzdálenost 1 je od bodů $\left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$, $\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2}\right)$; největší vzdálenost 2 je od bodů $(\sqrt{2}, -\sqrt{2})$, $(-\sqrt{2}, \sqrt{2})$

13.6 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definicí x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustrujte na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustrujte příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 14

Doplněk

14.1 Vektorové funkce, skalární a vektorová pole

14.1.1 Poznámky o vektorech v \mathbb{R}^3

1. Označení:

\vec{a}, \vec{b}, \dots — vektory, \vec{o} — nulový vektor

$\vec{a} = (a_1, a_2, a_3), \vec{b} = (b_1, b_2, b_3), \dots$ — složky vektorů

$\alpha = |\vec{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}, \beta = |\vec{b}|, \dots$ — velikost vektorů

$\vec{a}^0 = \frac{1}{\alpha}\vec{a}, \dots$ — jednotkový vektor stejné orientace, jako vektor \vec{a}

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — báze vektorového prostoru \mathbb{R}^3 ($\vec{a} = a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}$)

Pokud nebude hrozit nedorozumění, nebudeme rozlišovat mezi vektorem a jeho umístěním.

Úhlem vektorů rozumíme orientovaný dutý úhel, která tyto vektory svírají.

$\varphi = \widehat{\vec{a}\vec{b}}$ — úhel vektorů \vec{a}, \vec{b} v tomto pořadí.

2. Skalární součin vektorů \vec{a}, \vec{b} :

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \alpha\beta \cos \widehat{\vec{a}\vec{b}} = \alpha\beta \cos \varphi$$

$\vec{a} \cdot \vec{b} = \alpha\beta \cos \varphi = \alpha(\beta \cos \varphi) = \beta(\alpha \cos \varphi)$: Skalární součin vektorů \vec{a}, \vec{b} je součin velikosti jednoho z vektorů a velikosti kolmého průmětu druhého z vektorů do směru prvního.

Pro libovolné vektory $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ platí:

$$(i) \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = 0 \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{o} \text{ nebo } \vec{b} = \vec{o} \text{ nebo } \vec{a} \perp \vec{b}$$

$$(ii) \quad \vec{a} \cdot \vec{a} = \alpha^2 \cos 0 = \alpha^2, \quad \alpha = \sqrt{\vec{a} \cdot \vec{a}}, \quad \vec{a}^0 \cdot \vec{a}^0 = 1$$

$$(iii) \quad \cos \varphi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\alpha\beta} = \vec{a}^0 \cdot \vec{b}^0$$

$$(iv) \quad \vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}, \quad s(\vec{a} \cdot \vec{b}) = (s\vec{a}) \cdot \vec{b} = \vec{a} \cdot (s\vec{b}) \text{ pro libovolný skalár } s$$

$$(v) \quad \vec{a} \cdot (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \cdot \vec{c}$$

Je-li $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ ortonormální báze, tj. $\vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1, \vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0$ (a tak tomu bude v tomto odstavci vždy), pak

$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{b} &= (a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}) \cdot (b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + b_3\vec{k}) = \\ &= a_1b_1\vec{i} \cdot \vec{i} + a_1b_2\vec{i} \cdot \vec{j} + a_1b_3\vec{i} \cdot \vec{k} + a_2b_1\vec{j} \cdot \vec{i} + a_2b_2\vec{j} \cdot \vec{j} + \\ &\quad + a_2b_3\vec{j} \cdot \vec{k} + a_3b_1\vec{k} \cdot \vec{i} + a_3b_2\vec{k} \cdot \vec{j} + a_3b_3\vec{k} \cdot \vec{k} = \\ &= a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 \end{aligned}$$

3. Pravotočivý systém tří vektorů:

Systém vektorů $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ v tomto pořadí je pravotočivý, jestliže $\widehat{\vec{a}\vec{b}} \in (0, \pi), \widehat{\vec{b}\vec{c}} \in (0, \pi)$.

4. Vektorový součin vektorů \vec{a} , \vec{b} :

$\vec{a} \times \vec{b} = \vec{v}$, kde $|\vec{v}| = \alpha\beta \sin \widehat{\vec{a}\vec{b}}$, $\vec{a} \cdot \vec{v} = \vec{b} \cdot \vec{v} = 0$ a systém vektorů \vec{a} , \vec{b} , \vec{v} je pravotočivý. (Je to vektor kolmý k rovině určené vektory \vec{a} , \vec{b} , jehož velikost je číselně rovna ploše rovnoběžníku určeného vektory \vec{a} , \vec{b} a orientovaný podle pravidla pravé ruky.)

Pro libovolné vektory \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} platí:

$$(i) |\vec{a} \times \vec{b}| = \alpha\beta \sin \varphi = \alpha(\beta \sin \varphi) = \alpha\beta', \quad (\varphi = \widehat{\vec{a}\vec{b}}).$$

Je-li tedy \vec{b}' kolmý průmět vektoru \vec{b} do roviny kolmé k vektoru \vec{a} , je $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{a} \times \vec{b}'$

$$(ii) \vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a}$$

$$(iii) s(\vec{a} \times \vec{b}) = (s\vec{a}) \times \vec{b} = \vec{a} \times (s\vec{b}) \text{ pro libovolný skalár } s$$

$$(iv) \vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$$

D.: geometricky.

\vec{a} kolmý k rovině papíru, \vec{b}' , \vec{c}' kolmé průměty vektorů \vec{b} , \vec{c} .

Označme $\varphi_1 = \widehat{\vec{c}'\vec{b}'}$, $\varphi_2 = \widehat{\vec{b}'(\vec{a} \times \vec{c})}$, $\varphi_3 = \widehat{(\vec{a} \times \vec{c})(\vec{a} \times \vec{b})}$

$$\begin{aligned} (\vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}) \cdot (\vec{b}' + \vec{c}') &= (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{b}' + (\vec{a} \times \vec{c}) \cdot \vec{b}' + (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}' + (\vec{a} \times \vec{c}) \cdot \vec{c}' = \\ &= 0 + \alpha\gamma'\beta' \cos(-\varphi_2) + \alpha\beta'\gamma' \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) + 0 = \\ &= \alpha\beta'\gamma'(\cos \varphi_2 + \cos(\pi - \varphi_2)) = \alpha\beta'\gamma'(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_2) = 0 \end{aligned}$$

a tedy $(\vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}) \perp (\vec{b}' + \vec{c}')$, což znamená $\vec{a} \times (\vec{b}' + \vec{c}')^0 = (\vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c})^0$.

Dále rovnoběžník určený vektory \vec{c}' a \vec{b}' je podobný rovnoběžníku určenému vektory $\vec{a} \times \vec{c}$ a $\vec{a} \times \vec{b}$ a poněvadž $|\vec{a} \times \vec{b}| = \alpha\beta'$, $|\vec{a} \times \vec{c}| = \alpha\gamma'$, platí

$$|\vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}| = \alpha|\vec{b}' + \vec{c}'| = |\vec{a} \times (\vec{b}' + \vec{c}')|.$$

Tedy $\vec{a} \times (\vec{b}' + \vec{c}') = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$ a vzhledem k (i) je tvrzení dokázáno. \square

$$(v) \vec{a} \times \vec{b} = 0 \Leftrightarrow \vec{a} = 0 \text{ nebo } \vec{b} = 0 \text{ nebo } \vec{a} \parallel \vec{b} \text{ (tj. } \vec{a} = \kappa\vec{b} \text{ pro nějaký skalár } \kappa)$$

(vi) Je-li ortonormální báze \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} navíc pravotočivá (tj. $\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$, $\vec{j} \times \vec{k} = \vec{i}$, $\vec{k} \times \vec{i} = \vec{j}$) pak

$$\begin{aligned} \vec{a} \times \vec{b} &= (a_1\vec{i} + a_2\vec{j} + a_3\vec{k}) \times (b_1\vec{i} + b_2\vec{j} + b_3\vec{k}) = \\ &= a_1b_1\vec{i} \times \vec{i} + a_2b_1\vec{j} \times \vec{i} + a_3b_1\vec{k} \times \vec{i} + a_1b_2\vec{i} \times \vec{j} + a_2b_2\vec{j} \times \vec{j} + a_3b_2\vec{k} \times \vec{j} + \\ &\quad + a_1b_3\vec{i} \times \vec{k} + a_2b_3\vec{j} \times \vec{k} + a_3b_3\vec{k} \times \vec{k} = \\ &= -a_2b_1\vec{k} + a_3b_1\vec{j} + a_1b_2\vec{k} - a_3b_2\vec{i} - a_1b_3\vec{j} + a_2b_3\vec{i} = \\ &= (a_2b_3 - a_3b_2)\vec{i} - (a_1b_3 - a_3b_1)\vec{j} + (a_1b_2 - a_2b_1)\vec{k} = \\ &= \begin{vmatrix} a_2 & a_3 & \vec{i} \\ b_2 & b_3 & \vec{j} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & \vec{j} \\ b_1 & b_3 & \vec{k} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & \vec{k} \\ b_1 & b_2 & \vec{i} \end{vmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{Vektorový součin lze tedy symbolicky zapsat } \vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix}$$

5. Ještě jedna interpretace vektorového součinu:

Nechť nějaké těleso rotuje kolem pevné osy s úhlovou rychlostí ω . Zavedeme vektor $\vec{\omega}$ tak, aby byl rovnoběžný s osou rotace, měl velikost ω a byl orientován tak, že položíme-li na osu rotace pravou ruku s prsty ve směru rotace, bude $\vec{\omega}$ směřovat na stranu palce.

Na ose rotace zvolíme vztahný bod O a polohu libovolného bodu tělesa popíšeme směrovým vektorem \vec{r} . Nechť $\vec{r} = \vec{b} + \vec{a}$, kde \vec{b} leží v ose rotace a \vec{a} je na něj kolmý.

Velikost rychlosti bodu určeného polohovým vektorem \vec{r} je $|\vec{v}| = \omega|\vec{a}|$. Vektor \vec{v} je kolmý k vektoru $\vec{\omega}$ i k vektoru \vec{a} a systém vektorů $\vec{\omega}$, \vec{a} , \vec{v} je pravotočivý. Lze tedy psát $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{a} = \vec{\omega} \times (\vec{r} - \vec{b}) = \vec{\omega} \times \vec{r} - \vec{\omega} \times \vec{b} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, neboť $\vec{b} \parallel \vec{\omega}$.

6. Smíšený součin vektorů \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} :

$$[\vec{a}\vec{b}\vec{c}] = \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}).$$

Označme $\varphi = \widehat{\vec{b}\vec{c}}$, $\vartheta = \widehat{\vec{a}(\vec{b} \times \vec{c})}$. Pak $|\vec{b} \times \vec{c}| = \beta\gamma \sin \varphi$,

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) = \alpha\beta\gamma \sin \varphi \cos \vartheta = (\alpha \cos \vartheta)(\beta\gamma \sin \varphi),$$

tedy $|\widehat{[\vec{a}\vec{b}\vec{c}]}$ je objem rovnoběžnostěny určeného vektory \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} .

Úhel ϑ může být větší než pravý. V tom případě by vektor \vec{a} směřoval na opačnou stranu, než na obrázku, systém vektorů \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} by nebyl pravotočivý.

Platí:

(i) Jestliže $\widehat{[\vec{a}\vec{b}\vec{c}]} = \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) > 0$ pak je systém vektorů \vec{a} , \vec{b} , \vec{c} pravotočivý.

(ii) $\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) = (\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c}$.

D.: Podle 4.(vi) je

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) = a_1 \begin{vmatrix} b_2 & b_3 \\ c_2 & c_3 \end{vmatrix} - a_2 \begin{vmatrix} b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{vmatrix} + a_3 \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}$$

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \begin{vmatrix} a_2 & a_3 \\ b_2 & b_3 \end{vmatrix} c_1 - \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix} c_2 + \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} c_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}$$

□

14.1.2 Definice

Zobrazení $\vec{f}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$, $\vec{f}(t) = (f_1(t), f_2(t), f_3(t)) = f_1(t)\vec{i} + f_2(t)\vec{j} + f_3(t)\vec{k}$ nazýváme *vektorovou funkcí*.

Reálnou funkci jedné reálné proměnné budeme někdy nazývat *skalární funkcí*.

Poznámky: \vec{f} je spojitá v t_0 právě tehdy, když f_1 , f_2 , f_3 jsou spojitě v t_0

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \vec{f}(t) = \vec{a} \text{ právě tehdy, když } \lim_{t \rightarrow t_0} f_1(t) = a_1, \lim_{t \rightarrow t_0} f_2(t) = a_2, \lim_{t \rightarrow t_0} f_3(t) = a_3.$$

$$\text{Derivace: } \frac{d\vec{f}}{dt}(t_0) = \vec{f}'(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\vec{f}(t) - \vec{f}(t_0)}{t - t_0} = f_1'(t_0)\vec{i} + f_2'(t_0)\vec{j} + f_3'(t_0)\vec{k}.$$

Má-li vektorová funkce \vec{f} derivaci v bodě t_0 je v t_0 spojitá.

14.1.3 Věta

Buďte \vec{f} , \vec{g} vektorové funkce mající derivaci, φ skalární funkce mající derivaci. Pak

1. $\frac{d(\vec{f} \pm \vec{g})}{dt} = \frac{d\vec{f}}{dt} \pm \frac{d\vec{g}}{dt}$
2. $\frac{d(\varphi\vec{f})}{dt} = \frac{d\varphi}{dt}\vec{f} + \varphi \frac{d\vec{f}}{dt}$
3. $\frac{d(\vec{f} \cdot \vec{g})}{dt} = \frac{d\vec{f}}{dt} \cdot \vec{g} + \vec{f} \cdot \frac{d\vec{g}}{dt}$
4. $\frac{d(\vec{f} \times \vec{g})}{dt} = \frac{d\vec{f}}{dt} \times \vec{g} + \vec{f} \times \frac{d\vec{g}}{dt}$

D.: 1. a 2. jsou přímé důsledky 2.3.5.

$$3. \frac{d}{dt}(\vec{f} \cdot \vec{g}) = \frac{d}{dt}(f_1g_1 + f_2g_2 + f_3g_3) = f_1'g_1 + f_1g_1' + f_2'g_2 + f_2g_2' + f_3'g_3 + f_3g_3' = \frac{d\vec{f}}{dt} \cdot \vec{g} + \vec{f} \cdot \frac{d\vec{g}}{dt}$$

$$4. \frac{d}{dt}(\vec{f} \times \vec{g}) = \frac{d}{dt} \left((f_2g_3 - f_3g_2)\vec{i} - (f_1g_3 - f_3g_1)\vec{j} + (f_1g_2 - f_2g_1)\vec{k} \right) =$$

$$= (f_2'g_3 + f_2g_3' - f_3'g_2 - f_3g_2')\vec{i} - (f_1'g_3 + f_1g_3' - f_3'g_1 - f_3g_1')\vec{j} + (f_1'g_2 + f_1g_2' - f_2'g_1 - f_2g_1')\vec{k} =$$

$$= (f_2'g_3 - f_3'g_2)\vec{i} - (f_1'g_3 - f_3'g_1)\vec{j} + (f_2g_3' - f_3g_2')\vec{i} - (f_1g_3' - f_3g_1')\vec{j} + (f_1g_2' - f_2g_1')\vec{k} =$$

$$= \vec{f}' \times \vec{g} + \vec{f} \times \vec{g}'$$

□

14.1.4 Věta

Bud' \vec{f} nekonstantní jednotková funkce, tj. $\vec{f}(t) \cdot \vec{f}(t) = 1$ pro každé $t \in \text{Dom } \vec{f}$, která má v každém $t \in \text{Dom } \vec{f}$ derivaci. Pak vektory $\vec{f}(t)$ a $\vec{f}'(t)$ jsou kolmé pro každé $t \in \text{Dom } \vec{f}$.

D.:

$$\begin{aligned} \vec{f} \cdot \vec{f} &= 1 \quad / \quad \frac{d}{dt} \\ \frac{d\vec{f}}{dt} \cdot \vec{f} + \vec{f} \cdot \frac{d\vec{f}}{dt} &= 0 \\ 2 \left(\frac{d\vec{f}}{dt} \cdot \vec{f} \right) &= 0 \quad \text{z čehož plyne tvrzení.} \quad \square \end{aligned}$$

Podle 14.1.3.2 je $\frac{d\vec{f}}{dt} = \frac{d(\varphi \vec{f}^0)}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \vec{f}^0 + \varphi \frac{d\vec{f}^0}{dt}$ a podle 14.1.4 je $\vec{f}^0 \perp \frac{d\vec{f}^0}{dt}$. Dostali jsme tedy rozklad derivace vektorové funkce na složku rovnoběžnou s touto funkcí a na složku na ni kolmou.

14.1.5 Poznámka

Graf spojitě vektorové funkce \vec{r} je křivka v prostoru \mathbb{R}^3 . Má-li funkce \vec{r} v bodě t_0 derivaci různou od $\vec{0}$, pak přímka o parametrické rovnici

$$\vec{p}(t) = \vec{r}(t_0) + (t - t_0)\vec{r}'(t_0)$$

je tečnou ke křivce $\vec{r} = \vec{r}(t)$ v bodě $\vec{r}(t_0)$:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\vec{r}(t) - \vec{p}(t)}{t - t_0} = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\vec{r}(t) - \vec{r}(t_0) - (t - t_0)\vec{r}'(t_0)}{t - t_0} = \vec{r}'(t_0) - \vec{r}'(t_0) = 0.$$

14.1.6 Definice

Funkci $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ nazýváme *skalární pole*, zobrazení $\vec{g}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ nazýváme *vektorové pole*.

$\vec{r} = (x, y, z)$ — polohový vektor bodu (x, y, z)
 $f(x, y, z) = f(\vec{r})$, $\vec{g}(x, y, z) = \vec{g}(\vec{r})$
 Složky vektorového pole jsou skalární pole.

14.1.7 Diferenciální operátory

Hamiltonův operátor (symbolický vektor) $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$. (čte se „nabla“)

Je-li f skalární pole, definujeme jeho *gradient*: $\text{grad } f = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k}$.

Gradient skalárního pole je vektorovým polem.

Je-li f vektorové pole, definujeme jeho

$$\text{divergenci: } \text{div } \vec{g} = \nabla \cdot \vec{g} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) \cdot (g_1 \vec{i} + g_2 \vec{j} + g_3 \vec{k}) = \frac{\partial g_1}{\partial x} + \frac{\partial g_2}{\partial y} + \frac{\partial g_3}{\partial z}$$

$$\text{rotaci: } \text{rot } \vec{g} = \nabla \times \vec{g} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ g_1 & g_2 & g_3 \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial g_3}{\partial y} - \frac{\partial g_2}{\partial z} \right) \vec{i} - \left(\frac{\partial g_3}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial z} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial g_2}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial y} \right) \vec{k}$$

$$\text{gradient: } \text{grad } \vec{g} = \nabla \vec{g} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial y} & \frac{\partial g_1}{\partial z} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial y} & \frac{\partial g_2}{\partial z} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x} & \frac{\partial g_3}{\partial y} & \frac{\partial g_3}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Divergence vektorového pole je skalární pole, rotace vektorového pole je vektorové pole.

Laplaceův operátor $\Delta = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ přiřadí skalárnímu poli skalární pole, vektorovému poli vektorové pole.

14.1.8 Věta

Nechť φ , ψ jsou skalární a \vec{u} , \vec{v} vektorová pole. Pak platí

1. $\text{grad}(\varphi\psi) = \psi \text{grad } \varphi + \varphi \text{grad } \psi$.

D.: $\text{grad}(\varphi\psi) = \frac{\partial}{\partial x}(\varphi\psi)\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi\psi)\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi\psi)\vec{k} = \psi \frac{\partial \varphi}{\partial x}\vec{i} + \varphi \frac{\partial \psi}{\partial x}\vec{i} + \psi \frac{\partial \varphi}{\partial y}\vec{j} + \varphi \frac{\partial \psi}{\partial y}\vec{j} + \psi \frac{\partial \varphi}{\partial z}\vec{k} + \varphi \frac{\partial \psi}{\partial z}\vec{k} \quad \square$

2. $\text{div}(\varphi\vec{v}) = \text{grad } \varphi \cdot \vec{v} + \varphi \text{div } \vec{v}$

D.: $\text{div}(\varphi\vec{v}) = \frac{\partial \varphi v_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi v_2}{\partial y} + \frac{\partial \varphi v_3}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} v_1 + \varphi \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} v_2 + \varphi \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} v_3 + \varphi \frac{\partial v_3}{\partial z} \quad \square$

3. $\text{div}(\vec{u} \times \vec{v}) = \vec{v} \cdot \text{rot } \vec{u} - \vec{u} \cdot \text{rot } \vec{v}$

D.:
$$\begin{aligned} \text{div}(\vec{u} \times \vec{v}) &= \frac{\partial}{\partial x}(u_2 v_3 - u_3 v_2) - \frac{\partial}{\partial y}(u_1 v_3 - u_3 v_1) + \frac{\partial}{\partial z}(u_1 v_2 - u_2 v_1) = \\ &= \frac{\partial u_2}{\partial x} v_3 + \frac{\partial v_3}{\partial x} u_2 - \frac{\partial u_3}{\partial x} v_2 - \frac{\partial v_2}{\partial x} u_3 - \frac{\partial u_1}{\partial y} v_3 - \frac{\partial v_3}{\partial y} u_1 + \frac{\partial u_3}{\partial y} v_1 + \frac{\partial v_1}{\partial y} u_3 + \\ &\quad + \frac{\partial u_1}{\partial z} v_2 + \frac{\partial v_2}{\partial z} u_1 - \frac{\partial u_2}{\partial z} v_1 - \frac{\partial v_1}{\partial z} u_2 = \\ &= v_1 \left(\frac{\partial u_3}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) + v_2 \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} - \frac{\partial u_3}{\partial x} \right) + v_3 \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \\ &\quad + u_1 \left(\frac{\partial v_2}{\partial z} - \frac{\partial v_3}{\partial y} \right) + u_2 \left(\frac{\partial v_3}{\partial x} - \frac{\partial v_1}{\partial z} \right) + u_3 \left(\frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

□

4. $\text{grad}(\vec{u} \cdot \vec{v}) = \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{u} + \vec{u} \cdot \text{grad } \vec{v}$. Přitom \cdot na pravé straně rovnosti značí maticové násobení, vektory považujeme za řádkové.

D.:
$$\begin{aligned} \text{grad}(\vec{u} \cdot \vec{v}) &= \text{grad}(u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3) = \text{grad} \sum_{i=1}^3 u_i v_i = \\ &= \left(\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} v_i + u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} \right), \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial y} v_i + u_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right), \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial z} v_i + u_i \frac{\partial v_i}{\partial z} \right) \right) = \\ &= \left(\sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial u_i}{\partial x}, \sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial u_i}{\partial y}, \sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) + \left(\sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial v_i}{\partial x}, \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial v_i}{\partial y}, \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial v_i}{\partial z} \right) = \\ &= (v_1, v_2, v_3) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x} & \frac{\partial u_1}{\partial y} & \frac{\partial u_1}{\partial z} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x} & \frac{\partial u_2}{\partial y} & \frac{\partial u_2}{\partial z} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x} & \frac{\partial u_3}{\partial y} & \frac{\partial u_3}{\partial z} \end{pmatrix} + (u_1, u_2, u_3) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial v_1}{\partial x} & \frac{\partial v_1}{\partial y} & \frac{\partial v_1}{\partial z} \\ \frac{\partial v_2}{\partial x} & \frac{\partial v_2}{\partial y} & \frac{\partial v_2}{\partial z} \\ \frac{\partial v_3}{\partial x} & \frac{\partial v_3}{\partial y} & \frac{\partial v_3}{\partial z} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

□

14.1.9 Definice

Vektorová čára vektorového pole $\vec{g} = \vec{g}(\vec{r})$ je křivka v \mathbb{R}^3 taková, že vektor $\vec{g}(\vec{r})$ je tečným vektorem k této křivce v bodě určeném polohovým vektorem \vec{r} .

Je-li vektorové pole modelem proudění kapaliny, vektorové čáry se nazývají *proudnice*. Je-li vektorové pole modelem silového pole (gravitačního, elektromagnetického, ...), vektorové čáry se nazývají *siločáry*.

Má-li vektorová čára pole \vec{g} parametrické rovnice $\vec{r} = \vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$, pak podle 14.1.5 je

$$\frac{dx}{dt} = g_1, \quad \frac{dy}{dt} = g_2, \quad \frac{dz}{dt} = g_3, \quad \text{neboli}$$

$$\frac{dx}{g_1} = \frac{dy}{g_2} = \frac{dz}{g_3}.$$

Tato rovnice se nazývá *diferenciální rovnice vektorové čáry*.

Naopak, jestliže diferenciály složek vektoru $\vec{r} = \vec{r}(t)$ splňují předchozí rovnici, pak

$$g_2 dx - g_1 dy = 0, \quad g_3 dy - g_2 dz = 0, \quad g_3 dx - g_1 dz = 0.$$

Odtud

$$\vec{o} = (g_3 dy - g_2 dz)\vec{i} - (g_3 dx - g_1 dz)\vec{j} + (g_2 dx - g_1 dy)\vec{k} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ dx & dy & dz \\ g_1 & g_2 & g_3 \end{vmatrix} = d\vec{r} \times \vec{g},$$

tedy vektory $d\vec{r}$ a \vec{g} jsou rovnoběžné.

14.1.10 Definice

Buď $\vec{g} = \vec{g}(\vec{r})$ vektorové pole. Existuje-li skalární pole $f = f(\vec{r})$ takové, že $\vec{g} = -\text{grad } f$, pak se \vec{g} nazývá *potenciálové pole* a f se nazývá *potenciál* vektorového pole \vec{g} .

14.1.11 Věta

Vektorové pole $\vec{g} = \vec{g}(\vec{r})$ je potenciálové s potenciálem třídy C^2 právě tehdy, když $\text{rot } \vec{g} = \vec{o}$ v každém bodě $\text{Dom } \vec{g}$.

D.: Nechť \vec{g} je potenciálové pole a f je jeho potenciál. Pak

$$g_1 = -\frac{\partial f}{\partial x}, \quad g_2 = -\frac{\partial f}{\partial y}, \quad g_3 = -\frac{\partial f}{\partial z} \quad \text{a tedy} \quad \frac{\partial g_1}{\partial y} = \frac{\partial g_2}{\partial x}, \quad \frac{\partial g_1}{\partial z} = \frac{\partial g_3}{\partial x}, \quad \frac{\partial g_2}{\partial z} = \frac{\partial g_3}{\partial y}.$$

$$\text{Odtud } \text{rot } \vec{g} = \left(\frac{\partial g_3}{\partial y} - \frac{\partial g_2}{\partial z} \right) \vec{i} - \left(\frac{\partial g_3}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial z} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial g_2}{\partial x} - \frac{\partial g_1}{\partial y} \right) \vec{k} = \vec{o}.$$

Opačná implikace plyne z 12.3.9. \square

14.1.12 Poznámka (ospravedlnění pojmu rotace)

Nechť tuhé těleso rotuje kolem pevné osy procházející počátkem soustavy souřadnic úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$. (sr. 14.1.1.5)

Rychlost každého bodu tělesa o polohovém vektoru $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ je $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, neboli

$$v_1 = \omega_2 z - \omega_3 y, \quad v_2 = \omega_3 x - \omega_1 z, \quad v_3 = \omega_1 y - \omega_2 x.$$

Úhlová rychlost $\vec{\omega}$ nezávisí na \vec{r} a tedy

$$\frac{\partial v_2}{\partial z} = -\omega_1, \quad \frac{\partial v_3}{\partial y} = \omega_1, \quad \rightarrow \quad \omega_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_3}{\partial y} - \frac{\partial v_2}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial z} = \omega_2, \quad \frac{\partial v_3}{\partial x} = -\omega_2, \quad \rightarrow \quad \omega_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial z} - \frac{\partial v_3}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial y} = -\omega_3, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x} = \omega_3, \quad \rightarrow \quad \omega_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_2}{\partial x} - \frac{\partial v_1}{\partial y} \right)$$

Odtud plyne, že

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial v_3}{\partial y} - \frac{\partial v_2}{\partial z} \right) \vec{i} - \left(\frac{\partial v_3}{\partial x} - \frac{\partial v_1}{\partial z} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v_2}{\partial x} - \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) \vec{k} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{v}.$$

Úhlová rychlost rotace (ve významu „otáčení“) tuhého tělesa je rovna polovině rotace (ve významu „diferenciální operátor“) rychlosti jeho bodů.

Představíme-li si vektorové pole jako proudící kapalinu a je-li alespoň v jednom bodě rotace tohoto pole nenulová, lze si okolí tohoto bodu představit jako tuhé těleso, které rotuje. Neboli že v kapalině je vír.

Proto pole \vec{g} , které má (alespoň v jisté oblasti) nenulovou rotaci, se nazývá *vírové*. Potenciálové pole se někdy nazývá *nevírové*.

14.1.13 Příklady

1. Buďte φ, ψ skalární pole. Vypočítejte $\operatorname{div}(\varphi \operatorname{grad} \psi)$.

Řešení: $\nabla \varphi \cdot \nabla \psi + \varphi \Delta \psi$.

2. Buď \vec{v} vektorové pole. Vypočítejte $\operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}$.

Řešení: $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{v} + \Delta \vec{v}$.

Část V

Integrální počet funkcí n proměnných

Kapitola 15

Jordanova míra

Pojem míry podmnožiny prostoru \mathbb{R}^k sjednocuje a zobecňuje pojem obsahu rovinných obrazců a objemu prostorových těles. Např. obsah rovinného obrazce je mírou v \mathbb{R}^2 . Pro $A \subseteq \mathbb{R}^n$ označme $m(A)$ míru množiny A ; lze ji chápat jako zobrazení z množiny podmnožin \mathbb{R}^k do množiny nezáporných reálných čísel. Míra by měla splňovat následující přirozené podmínky:

- (i) Jsou-li množiny A, B shodné, pak $m(A) = m(B)$.
- (ii) Je-li $A \subseteq B$, pak $m(A) \leq m(B)$.
- (iii) Je-li $A \cap B = \emptyset$, pak $m(A \cup B) = m(A) + m(B)$.

Obecnou míru v prostoru \mathbb{R}^n jako první zkonstruoval Camille Jordan (1838–1922). Pro názornost podrobně ukážeme konstrukci Jordanovy míry v \mathbb{R}^2 .

15.1 Jordanova míra v \mathbb{R}^2

15.1.1 Definice

Nechť $n, j, k \in \mathbb{Z}$, $n \geq 0$. Čtverec řádu n definujeme jako množinu

$$W_{j,k}^n = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 : \frac{j}{2^n} \leq x \leq \frac{j+1}{2^n}, \frac{k}{2^n} \leq y \leq \frac{k+1}{2^n} \right\}.$$

Množinu všech čtverců řádu n nazveme *síť řádu n* a síť řádu 0 nazveme *základní síť*.

Konečné sjednocení čtverců řádu n nazveme *elementární množina řádu n* .

Reálné číslo

$$m(W_{j,k}^n) = m(W^n) = \left(\frac{1}{2^n}\right)^2 = \frac{1}{4^n}$$

nazveme mírou čtverce řádu n . Dále klademe $m(\emptyset) = 0$.

Je-li $M = \bigcup_{(j,k) \in I} W_{j,k}^n$ elementární množina řádu n , pak klademe

$$m(M) = m\left(\bigcup_{(j,k) \in I} W_{j,k}^n\right) = \sum_{(j,k) \in I} m(W_{j,k}^n),$$

tj. *míra elementární množiny řádu n* je součtem měr všech čtverců, které ji tvoří.

Poznámky:

Pokud nebude záležet na umístění čtverce, tedy na dolních indexech j, k , budeme je často vynechávat.

Poněvadž každý čtverec řádu n je sjednocením čtyř čtverců řádu $n+1$, platí $m(W^n) = 4m(W^{n+1})$.

Snadno ověříme, že míra elementárních množin splňuje podmínky (i)–(iii) z úvodu kapitoly.

15.1.2 Definice

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničená množina.

Jádro řádu n množiny A značené $\mathcal{K}_n(A)$ definujeme jako největší (vzhledem k množinové inkluzi) elementární množinu řádu n , která je obsažena ve vnitřku množiny A , tj.

$$\mathcal{K}_n(A) = \bigcup \{W^n : W^n \subseteq A^\circ\}.$$

Obal řádu n množiny A značený $\mathcal{C}_n(A)$ definujeme jako nejmenší (vzhledem k množinové inkluzi) elementární množinu řádu n , jejíž vnitřek obsahuje uzávěr množiny A , tj.

$$\mathcal{C}_n(A) = \bigcup \{W^n : \bar{A} \cap W^n \neq \emptyset\}.$$

Neexistuje-li čtverec řádu n , který by byl částí A° , klademe $\mathcal{K}_n(A) = \emptyset$. Je-li $A = \emptyset$, klademe $\mathcal{C}_n(A) = \emptyset$.

Poznámky: Z definice bezprostředně plynou inkluze

$$\mathcal{K}_n(A) \subseteq A^\circ \subseteq A \subseteq \bar{A} \subseteq \mathcal{C}_n(A).$$

Dále zřejmě platí: Ke každé ohraničené množině $A \subseteq \mathbb{R}^2$ lze sestrojít posloupnosti měř

$$\{m(\mathcal{K}_n(A))\}_{n=0}^\infty \quad \text{a} \quad \{m(\mathcal{C}_n(A))\}_{n=0}^\infty.$$

15.1.3 Věta

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničená množina. Pak platí $m(\mathcal{C}_n(\partial A)) = m(\mathcal{C}_n(A)) - m(\mathcal{K}_n(A))$.

D.: Čtverce, které tvoří elementární množinu $\mathcal{C}_n(A)$ můžeme rozdělit do dvou disjunktních skupin: ty, které obsahují hraniční body množiny A a ty, které je neobsahují. Čtverce z první skupiny tvoří elementární množinu $\mathcal{C}_n(\partial A)$ a čtverce z druhé skupiny tvoří elementární množinu $\mathcal{K}_n(A)$. Z vlastnosti (iii) míry elementárních množin nyní plyne $m(\mathcal{K}_n(A)) + m(\mathcal{C}_n(\partial A)) = m(\mathcal{C}_n(A))$, a tedy i dokazovaná rovnost. \square

15.1.4 Věta

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničená množina. Pak pro každé $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ platí

$$m(\mathcal{K}_n(A)) \leq m(\mathcal{K}_{n+1}(A)), \quad m(\mathcal{C}_n(A)) \geq m(\mathcal{C}_{n+1}(A)).$$

D.: Nerovnosti plynou ze zřejmých inkluzí $\mathcal{K}_n(A) \subseteq \mathcal{K}_{n+1}(A)$, $\mathcal{C}_n(A) \supseteq \mathcal{C}_{n+1}(A)$. \square

15.1.5 Důsledek

Posloupnosti měř $\{m(\mathcal{K}_n(A))\}_{n=0}^\infty$ a $\{m(\mathcal{C}_n(A))\}_{n=0}^\infty$ mají (vlastní) limitu.

D.: Plyne z věty o monotonních posloupnostech 1.3.9, neboť $\{m(\mathcal{K}_n(A))\}_{n=0}^\infty$ je neklesající a shora ohraničená hodnotou $m(\mathcal{K}_0(A))$; $\{m(\mathcal{C}_n(A))\}_{n=0}^\infty$ je nerostoucí a zdola ohraničená hodnotou 0. \square

Toto tvrzení nás opravňuje k následující definici:

15.1.6 Definice

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničená množina. Číslo

$$m_*(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(\mathcal{K}_n(A))$$

se nazývá *vnitřní Jordanova míra množiny A* a číslo

$$m^*(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(\mathcal{C}_n(A))$$

se nazývá *vnější Jordanova míra množiny A* . Jestliže $m_*(A) = m^*(A)$, pak řekneme, že *množina A je Jordanovsky měřitelná* a číslo $m(A) = m_*(A) = m^*(A)$ se nazývá *Jordanova míra množiny A* .

Poznamenejme, že vždy platí $0 \leq m_*(A) \leq m^*(A)$.

15.1.7 Příklad

Položme $A = \{(x, y) \in \mathbb{Q}^2 : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$. Pak $A^\circ = \emptyset$ a tedy také $\mathcal{K}_n(A) = \emptyset$ pro libovolné $n \in \mathbb{N}$. To znamená, že $m_*(A) = 0$. Dále $\bar{A} = [0, 1] \times [0, 1] = W_{0,0}^0$ a tedy

$$\begin{aligned} m(\mathcal{C}_0(A)) &= 1 + 8 \cdot 1 = 1 + \frac{2 \cdot 4}{2^0}, \\ m(\mathcal{C}_1(A)) &= 1 + 12 \cdot \frac{1}{4} = 1 + \frac{3 \cdot 4}{2^2}, \\ m(\mathcal{C}_2(A)) &= 1 + 20 \cdot \frac{1}{16} = 1 + \frac{5 \cdot 4}{2^4}, \\ &\vdots \\ m(\mathcal{C}_n(A)) &= 1 + (4 \cdot 2^n + 4) \cdot \left(\frac{1}{2^n}\right)^2 = 1 + \frac{(2^n + 1)4}{2^{2n}} = 1 + 4 \left(\frac{1}{2^n} + \frac{1}{2^{2n}}\right). \end{aligned}$$

Tedy $m^*(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + 4 \left(\frac{1}{2^n} + \frac{1}{2^{2n}}\right)\right) = 1$. Poněvadž $m_*(A) = 0 < 1 = m^*(A)$, není množina A měřitelná.

15.1.8 Věta

Je-li $m^*(A) = 0$, pak množina A je měřitelná a platí $m(A) = 0$.

D.: Plyne bezprostředně z poznámky za definicí 15.1.6. \square

15.1.9 Věta

Buďte $A, B \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničené množiny. Pak platí

1. Je-li $A \subseteq B$ pak $m_*(A) \leq m_*(B)$ a $m^*(A) \leq m^*(B)$.
2. $m^*(A \cup B) \leq m^*(A) + m^*(B)$.
3. Je-li $A \cap B = \emptyset$ pak $m_*(A) + m_*(B) \leq m_*(A \cup B)$.

D.: První tvrzení plyne z 11.2.2.4, druhé z 11.2.2.5 a třetí z faktu, že $\mathcal{K}_n(A) \cup \mathcal{K}_n(B) \subseteq \mathcal{K}_n(A \cup B)$. \square

15.1.10 Věta

Buďte $A, B \subseteq \mathbb{R}^2$ měřitelné množiny. Pak platí

1. Je-li $A \subseteq B$ pak $m(A) \leq m(B)$.
2. Je-li $A \cap B = \emptyset$ pak množina $A \cup B$ je měřitelná a platí $m(A \cup B) = m(A) + m(B)$.

D.: První tvrzení plyne z 15.1.9.1. Je-li $A \cap B = \emptyset$ pak s využitím 15.1.9.3 a 15.1.9.2 dostaneme

$$m_*(A) + m_*(B) \leq m_*(A \cup B) \leq m^*(A \cup B) \leq m^*(A) + m^*(B),$$

tedy

$$m(A) + m(B) = m(A \cup B) = m(A \cup B) = m(A) + m(B).$$

\square

Jordanova míra tedy má vlastnosti (ii) a (iii) z úvodu kapitoly.

15.1.11 Věta

Konečná množina $A \subseteq \mathbb{R}^2$ je měřitelná a platí $m(A) = 0$.

D.: Nechť $A = \{a\}$ je jednoprvková množina. Bod a je prvkem nejvýše čtyř čtverců řádu n , tedy

$$m^*(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} 4 \frac{1}{4^n} = 0. \text{ Podle 15.1.8 je } A \text{ měřitelná a } m(A) = 0. \text{ Důkaz nyní dokončíme indukcí. } \square$$

Poznámka: Opačné tvrzení samozřejmě neplatí; z $m(A) = 0$ neplyne, že by množina A byla konečná.

Př.: $A = \{(x, 0) : 0 \leq x \leq 1\}$, $m^*(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} (2 \cdot 2^n + 4) \frac{1}{4^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2^{n-1}} + \frac{1}{4^{n-1}} \right) = 0$ a tedy $m(A) = 0$.

15.1.12 Věta

Ohraničená množina $A \subseteq \mathbb{R}^2$ je měřitelná právě tehdy, když $m(\partial A) = 0$.

D.: Podle 15.1.3 platí $m^*(\partial A) = m^*(A) - m_*(A)$. Odtud plyne tvrzení. \square

15.1.13 Věta

Jsou-li množiny A, B měřitelné, pak také množiny $A \cup B, A \cap B, A \setminus B$ jsou měřitelné.

D.: Podle 15.1.12 je $m(\partial A) = m(\partial B) = 0$.

Poněvadž $\partial(A \cup B) \subseteq \partial A \cup \partial B$, s využitím 15.1.9.1 a 15.1.9.2 dostaneme

$$0 \leq m^*(\partial(A \cup B)) \leq m^*(\partial A \cup \partial B) \leq m^*(\partial A) + m^*(\partial B) = 0.$$

Podobně, poněvadž $\partial(A \cap B) \subseteq \partial A \cup \partial B$, dostaneme $m^*(\partial(A \cap B)) = 0$.

Dále $\partial(A \setminus B) = \partial(A \cap (\mathbb{R}^2 \setminus B)) \subseteq \partial A \cup \partial(\mathbb{R}^2 \setminus B) = \partial A \cup \partial B$, takže opět $m^*(\partial(A \setminus B)) = 0$. \square

15.1.14 Věta

Jsou-li A, B měřitelné množiny, pro něž $m(A \cap B) = 0$, pak $m(A \cup B) = m(A) + m(B)$.

D.: Poněvadž $A \cup B = A \cup (B \setminus A)$ a $A \cap (B \setminus A) = \emptyset$, z 15.1.10 plyne $m(A \cup B) = m(A) + m(B \setminus A)$.

Dále $B = (B \setminus A) \cup (A \cap B)$ a $(B \setminus A) \cap (A \cap B) = \emptyset$, takže $m(B) = m(B \setminus A) + m(A \cap B)$.

Odečtením těchto rovnic dostaneme

$$m(A \cup B) = m(A) + m(B) - m(A \cap B),$$

z čehož plyne tvrzení. \square

Z této věty také plyne vlastnost (iii) z úvodu kapitoly.

15.1.15 Věta (míra obdélníku)

Budte a_1, b_1, a_2, b_2 reálná čísla taková, že $a_1 \leq b_1, a_2 \leq b_2$. Obdélník

$$Q = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a_1 \leq x \leq b_1, a_2 \leq y \leq b_2\}$$

je měřitelnou množinou a $m(Q) = (b_1 - a_1)(b_2 - a_2)$.

D.: Připomeňme, že $[x]$ označuje celou část čísla x . Platí

$$\begin{aligned} m(\mathcal{K}_n(Q)) &\geq \left[\frac{b_1 - a_1}{\frac{1}{2^n}} - 1 \right] \cdot \left[\frac{b_2 - a_2}{\frac{1}{2^n}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{4^n} \geq (2^n(b_1 - a_1) - 2)(2^n(b_2 - a_2) - 2) \frac{1}{4^n} = \\ &= \left((b_1 - a_1) - \frac{1}{2^{n-1}} \right) \left((b_2 - a_2) - \frac{1}{2^{n-1}} \right) = (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) - \frac{1}{2^{n-1}}(b_1 + b_2 - a_1 - a_2) + \frac{1}{4^{n-1}}, \end{aligned}$$

$$m(\mathcal{C}_n(Q)) \leq \left[\frac{b_1 - a_1}{\frac{1}{2^n}} + 2 \right] \left[\frac{b_2 - a_2}{\frac{1}{2^n}} + 2 \right] \frac{1}{4^n} \leq (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) + \frac{1}{2^{n-1}}(b_1 + b_2 - a_1 - a_2) + \frac{1}{4^{n-1}}.$$

Tedy

$$m_*(Q) \geq (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \geq m^*(Q),$$

avšak $m_*(Q) \leq m^*(Q)$, z čehož plyne $m_*(Q) = m^*(Q) = (b_1 - a_1)(b_2 - a_2)$. \square

15.1.16 Lemma

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ohraničená množina, $F : A \rightarrow \mathbb{R}^2$ lipschitzovské zobrazení (tj. existuje nezáporná konstanta L taková, že pro každé dva body $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in \mathbb{R}^2$ platí $\rho(F(x_1, y_1), F(x_2, y_2)) \leq L\rho((x_1, y_1), (x_2, y_2))$ kde ρ je euklidovská metrika nebo metrika s euklidovskou ekvivalentní). Pak $m^*(F(A)) \leq 4L^2m^*(A)$.

D.: Buď l_n počet čtverců řádu n tvořících obal množiny A . Míra čtverce řádu n je $\frac{1}{4^n}$. Tedy $m(\mathcal{C}_n(A)) = l_n \frac{1}{4^n}$; odtud $l_n = 4^n m(\mathcal{C}_n(A))$.

Euklidovská vzdálenost každých dvou bodů $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ležících ve čtverci řádu n je nejvýše rovna úhlopříčce tohoto čtverce, tj. $\rho((x_1, y_1), (x_2, y_2)) \leq \frac{\sqrt{2}}{2^n}$. Pro vzdálenost jejich obrazů platí

$$\rho(F(x_1, y_1), F(x_2, y_2)) \leq L\rho((x_1, y_1), (x_2, y_2)) \leq \frac{L\sqrt{2}}{2^n} < \frac{L}{2^{n-1}}.$$

Část množiny A , která leží ve čtverci řádu n se zobrazí do kruhu o průměru $\frac{L}{2^{n-1}}$, tedy do čtverce K_n se stranami délky $\frac{L}{2^{n-1}}$ a rovnoběžnými se souřadnými osami. Podle 15.1.15 je míra tohoto čtverce rovna

$$m(K_n) = \frac{L^2}{2^{2n-2}} = \frac{L^2}{4^{n-1}}.$$

Množina $K = F(\mathcal{C}_n(A))$ je sjednocením všech čtverců K_n . Podle 15.1.9.2 je

$$m^*(K) \leq l_n m(K_n) = 4^n m(\mathcal{C}_n(A)) \frac{L^2}{4^{n-1}} = 4L^2 m(\mathcal{C}_n(A)).$$

Dále, poněvadž $F(A) \subseteq F(\mathcal{C}_n(A)) = K$, podle 15.1.9.1 je $m^*(F(A)) \leq 4L^2 m(\mathcal{C}_n(A))$. Odtud limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ dostaneme tvrzení věty. \square

15.1.17 Důsledky

1. Má-li množina $A \subseteq \mathbb{R}^2$ míru 0 a zobrazení $F : A \rightarrow \mathbb{R}^2$ je lipschitzovské, pak $m(F(A)) = 0$.
2. Buď f funkce definovaná na uzavřeném intervalu $[a, b]$, která je lipschitzovská s konstantou l . Pak graf této funkce má míru 0, tj. $m(\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, y = f(x)\}) = 0$.

D.: Označme $A = \{(x, 0) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b\}$ a definujme zobrazení $F : A \rightarrow \mathbb{R}^2$ předpisem $F(x, 0) = (x, f(x))$. Pak pro libovolná $x_1, x_2 \in [a, b]$ platí

$$\begin{aligned} \rho(F(x_1, 0), F(x_2, 0)) &= \rho((x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2))) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (f(x_2) - f(x_1))^2} \leq \\ &\leq \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + l^2(x_2 - x_1)^2} = \sqrt{1 + l^2} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + 0^2} = \sqrt{1 + l^2} \rho((x_1, 0), (x_2, 0)). \end{aligned}$$

Zobrazení F je tedy lipschitzovské s konstantou $\sqrt{1 + l^2}$. Podle 15.1.16 pro míru grafu funkce f platí

$$m(F(A)) \leq 4(1 + l^2)m^*(A).$$

Dále platí

$$m^*(A) \leq m(\mathcal{C}_n(A)) \leq 2[2^n(b - a) + 2] \frac{1}{4^n} < \frac{b - a}{2^{n-1}}.$$

Poněvadž poslední výraz má pro $n \rightarrow \infty$ limitu 0, je $m^*(A) = 0$. Tím je důkaz úplný. \square

Obrazec v rovině je nějaká podmnožina \mathbb{R}^2 , jejíž hranice je rovinná křivka. Tuto křivku lze obvykle rozdělit na konečně mnoho částí, z nichž každou lze vyjádřit jako graf nějaké funkce jedné proměnné x nebo y . Je-li každá z takových funkcí lipschitzovská, je míra hranice obrazce podle posledního tvrzení nulová a to podle 15.1.12 znamená, že takový obrazec je měřitelnou množinou.

15.2 Závislost míry na transformaci souřadnic

15.2.1 Věta

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^2$ měřitelná množina, $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ isometrické zobrazení. Pak je množina $F(A)$ měřitelná a platí $m(F(A)) = m(A)$.

D.: Poněvadž F je isometrické, tj. $\rho(F(x_1, y_1), F(x_2, y_2)) = \rho((x_1, y_1), (x_2, y_2))$, je toto zobrazení také lipschitzovské s konstantou 1 a zejména je tedy spojitě.

Ze spojitosti zobrazení F plyne $F(\partial A) = \partial F(A)$ a z měřitelnosti množiny A plyne $m(\partial A) = 0$. Podle 15.1.17.1 je tedy také $m(\partial F(A)) = 0$, což podle 15.1.12 znamená, že množina $F(A)$ je měřitelná. Analogicky ukážeme, že pro čtverec W^n řádu n je množina $F(W^n)$ měřitelná. (Pozn.: Množina $F(W^n)$ je zase čtverec o straně délky 2^{-n} , ale jeho strany obecně nejsou rovnoběžné s osami, takže jeho míru nelze vypočítat podle 15.1.15.)

Je-li $m(A) = 0$, je $m(F(A)) = 0$ podle 15.1.17.

Nechť $m(A) > 0$. Položme $\kappa_F = \frac{m(F(W^n))}{m(W^n)}$.

Číslo κ_F nezávisí na n , neboť podle 15.1.14 je $\frac{m(F(W^n))}{m(W^n)} = \frac{4m(F(W^{n+1}))}{4m(W^{n+1})}$. Počet množin $F(W^n)$ tvořících množinu $F(\mathcal{K}_n(A))$ je stejný jako počet čtverců W^n tvořících množinu $\mathcal{K}_n(A)$, neboť zobrazení F je podle 11.1.11 prosté. Tedy $\frac{m(F(\mathcal{K}_n(A)))}{m(\mathcal{K}_n(A))} = \kappa_F$. Podobnou úvahou dostaneme $\frac{m(F(\mathcal{C}_n(A)))}{m(\mathcal{C}_n(A))} = \kappa_F$. Odtud

$$m(F(\mathcal{K}_n(A))) = \kappa_F m(\mathcal{K}_n(A)) \leq \kappa_F m_*(A) = \kappa_F m^*(A) \leq \kappa_F m(\mathcal{C}_n(A)) = m(F(\mathcal{C}_n(A))).$$

Limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ dostaneme

$$\kappa_F m(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(F(\mathcal{K}_n(A))) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} m(F(\mathcal{C}_n(A))) = \kappa_F m(A),$$

tedy $\lim_{n \rightarrow \infty} m(F(\mathcal{K}_n(A))) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(F(\mathcal{C}_n(A)))$. Poněvadž $F(\mathcal{K}_n(A)) \subseteq F(A) \subseteq F(\mathcal{C}_n(A))$, dále platí

$$m(F(\mathcal{K}_n(A))) \leq m(F(A)) \leq m(F(\mathcal{C}_n(A))),$$

takže z předchozí rovnosti a z věty o třech posloupnostech 1.3.7 dostaneme $m(F(A)) = \kappa_F m(A)$. Tento vztah platí pro libovolnou měřitelnou množinu A , zejména tedy pro jednotkový kruh. Avšak isometrické zobrazení převádí jednotkový kruh na jednotkový kruh. Z toho plyne, že $\kappa_F = 1$. \square

Z věty zejména plyne, že Jordanova míra splňuje požadavek (i) z úvodu kapitoly.

15.2.2 Lemma

Jordanova míra rovnoběžníku P o straně a a výšce v na ni spuštěné je $m(P) = av$.

D.: Nejprve poznamenejme, že hranice rovnoběžníku je tvořena čtyřmi úsečkami, což jsou podle 15.1.17 množiny Jordanovy míry 0, takže podle 15.1.12 je rovnoběžník měřitelnou množinou.

Označme α jeden vnitřní úhel rovnoběžníku a dále $\kappa = \operatorname{tg} \alpha$. Rotace a posunutí jsou isometrická zobrazení. Podle 15.2.1 tedy stačí určit míru rovnoběžníku P s vrcholy $(0, 0)$, $(a, 0)$, $(v\kappa, v)$, $(v\kappa + a, v)$.

Buď $n \in \mathbb{N}$. Do uvažovaného rovnoběžníku lze vepsat soustavu obdélníků

$$\left[(i+1) \frac{v}{n\kappa}, i \frac{v}{n\kappa} + a \right] \times \left[i \frac{v}{n}, (i+1) \frac{v}{n} \right], \quad i = 0, 1, \dots, (n-1)$$

a lze mu opsat soustavu obdélníků

$$\left[i \frac{v}{n\kappa}, (i+1) \frac{v}{n\kappa} + a \right] \times \left[i \frac{v}{n}, (i+1) \frac{v}{n} \right], \quad i = 0, 1, \dots, (n-1).$$

Podle 15.1.15 je míra každého vepsaného obdélníku $\frac{v}{n} \left(a - \frac{v}{n\kappa} \right)$ a míra každého opsaného obdélníku je $\frac{v}{n} \left(a + \frac{v}{n\kappa} \right)$.

Označme U_n sjednocení všech opsaných obdélníků a V_n sjednocení všech vepsaných obdélníků. Množiny U_n a V_n jsou měřitelné a platí $U_n \subseteq P \subseteq V_n$,

$$m(U_n) = n \frac{v}{n} \left(a - \frac{v}{n\kappa} \right) = v \left(a - \frac{v}{n\kappa} \right), \quad m(V_n) = v \left(a + \frac{v}{n\kappa} \right).$$

Podle 15.1.10.1 je

$$av - \frac{v^2}{n\kappa} \leq m(P) \leq av + \frac{v^2}{n\kappa}$$

pro každé $n \in \mathbb{N}$ a tedy $m(P) = av$. \square

15.2.3 Lemma

Míra rovnoběžníku P určeného vektory $\vec{u} = (x_1, x_2)$ a $\vec{v} = (x_2, y_2)$ je rovna absolutní hodnotě determinantu

$$\begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{vmatrix}.$$

D.: Podle 15.2.2 je Jordanova míra rovnoběžníku dána formulí známou ze střední školy. Označíme-li tedy α úhel vektorů \vec{u} a \vec{v} , můžeme psát

$$m(P) = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot |\sin \alpha|.$$

Označme dále γ úhel vektorů $(0, 1)$ a \vec{u} , β úhel vektorů $(0, 1)$ a \vec{v} . Pak je

$$\sin \gamma = \frac{y_1}{|\vec{u}|}, \quad \cos \gamma = \frac{x_1}{|\vec{u}|}, \quad \sin \beta = \frac{y_2}{|\vec{v}|}, \quad \cos \beta = \frac{x_2}{|\vec{v}|},$$

a tedy

$$|\sin \alpha| = |\sin(\beta - \gamma)| = |\sin \beta \cos \gamma - \sin \gamma \cos \beta| = \left| \frac{y_2 x_1}{|\vec{u}| |\vec{v}|} - \frac{y_1 x_2}{|\vec{u}| |\vec{v}|} \right| = \frac{1}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} |x_1 y_2 - x_2 y_1|,$$

což je dokazované tvrzení. \square

15.2.4 Věta (o závislosti míry množiny na lineární transformaci)

Buď $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ regulární lineární zobrazení s maticí (ℓ_{ij}) (tj. $D = \det(\ell_{ij}) \neq 0$). Je-li $A \subseteq \mathbb{R}^2$ měřitelná množina, pak je i $L(A)$ měřitelná množina a platí

$$m(L(A)) = |\det(\ell_{ij})| m(A) = |\ell_{11}\ell_{22} - \ell_{12}\ell_{21}| m(A).$$

D.: Označme $(u_1, u_2) = L(x, y)$, tedy $u_1 = \ell_{11}x + \ell_{12}y$, $u_2 = \ell_{21}x + \ell_{22}y$.

Poněvadž zobrazení L je lineární, transformuje systém rovnoběžných, stejně vzdálených přímk na jiný systém rovnoběžných stejně vzdálených přímek. To znamená, že zobrazení L transformuje síť čtverců řádu n na soustavu shodných rovnoběžníků. Určíme $m(L(W_{0,0}^n))$.

Čtverec $W_{0,0}^n$ je určen vektory $\frac{1}{2^n}(1, 0)$, $\frac{1}{2^n}(0, 1)$, rovnoběžník $L(W_{0,0}^n)$ je určen vektory $\vec{u} = (u_1, u_2)$, $\vec{v} = (v_1, v_2)$, kde $u_1 = \frac{1}{2^n}\ell_{11}$, $u_2 = \frac{1}{2^n}\ell_{21}$, $v_1 = \frac{1}{2^n}\ell_{12}$, $v_2 = \frac{1}{2^n}\ell_{22}$. Tedy podle 15.2.3 je

$$m(L(W_{0,0}^n)) = \begin{vmatrix} \frac{1}{2^n}\ell_{11} & \frac{1}{2^n}\ell_{12} \\ \frac{1}{2^n}\ell_{21} & \frac{1}{2^n}\ell_{22} \end{vmatrix} = \frac{1}{2^{2n}} |\det(\ell_{ij})| = |\det(\ell_{ij})| \cdot m(W^n).$$

Nechť jádro $\mathcal{K}_n(A)$ množiny A se skládá z k čtverců řádu n , tj. $\mathcal{K}_n(A) = \bigcup_{(p,q) \in I} W_{p,q}^n$, kde I je nějaká k -prvková množina dvojic celých čísel. Pak platí

$$m_*(L(A)) \geq m_*(L(\mathcal{K}_n(A))) = m_* \left(L \left(\bigcup_{(p,q) \in I} W_{p,q}^n \right) \right),$$

neboť z inkluze $\mathcal{K}_n(A) \subseteq A$ plyne stejná inkluze pro obrazy množin, tj. $L(\mathcal{K}_n(A)) \subseteq L(A)$ a nerovnost tedy vyplývá z 15.1.9.1. Dále snadno ověříme, že $\bigcup_{(p,q) \in I} L(W_{p,q}^n) \subseteq L \left(\bigcup_{(p,q) \in I} W_{p,q}^n \right)$. Každá z množin $L(W_{p,q}^n)$ je měřitelná a tyto množiny mají společnou nejvýše hranici, tedy množinu Jordanovy míry 0. Z předchozí inkluze a z 15.1.10.2 dostaneme

$$\begin{aligned} m_*(L(A)) &\geq m_* \left(L \left(\bigcup_{(p,q) \in I} W_{p,q}^n \right) \right) \geq m_* \left(\bigcup_{(p,q) \in I} L(W_{p,q}^n) \right) = \sum_{(p,q) \in I} m(L(W_{p,q}^n)) = \\ &= \sum_{(p,q) \in I} |\det(\ell_{ij})| m(W_{p,q}^n) = |\det(\ell_{ij})| \sum_{(p,q) \in I} m(W_{p,q}^n) = |\det(\ell_{ij})| m(\mathcal{K}_n(A)). \end{aligned}$$

Celkem tedy $m_*(L(A)) \geq |\det(\ell_{ij})| m(\mathcal{K}_n(A))$. Analogicky ověříme platnost nerovnosti $m^*(L(A)) \leq |\det(\ell_{ij})| m(\mathcal{C}_n(A))$. Platí tedy nerovnosti

$$|\det(\ell_{ij})| m(\mathcal{K}_n(A)) \leq m_*(L(A)) \leq m^*(L(A)) \leq |\det(\ell_{ij})| m(\mathcal{C}_n(A)),$$

ze které limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ a s využitím 1.3.7 dostaneme tvrzení. \square

15.3 Jordanova míra v \mathbb{R}^k

Jordanovu míru v \mathbb{R}^k , $k = 1, 2, 3, \dots$, lze konstruovat stejně jako míru v \mathbb{R}^2 . Místo čtverců řádu n se uvažují k -rozměrné krychle řádu n

$$W_{m_1, \dots, m_k}^n = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{R}^k : \frac{m_1}{2^n} \leq x_1 \leq \frac{m_1 + 1}{2^n}, \frac{m_2}{2^n} \leq x_2 \leq \frac{m_2 + 1}{2^n}, \dots, \frac{m_k}{2^n} \leq x_k \leq \frac{m_k + 1}{2^n} \right\}.$$

Jejich Jordanovu míru definujeme vztahem $m(W^n) = \frac{1}{2^{kn}}$.

Krychle řádu n obsahuje 2^k krychlí řádu $n + 1$.

Všechny věty z předchozích dvou odstavců po příslušné úpravě předpokladů zůstávají v platnosti.

Tentýž geometrický útvar může mít různou míru v prostorech různé dimenze. Např. jednotková úsečka

- v prostoru $\mathbb{R}^1 = \mathbb{R}$ je krychlí řádu 0 a její míra je tedy 1;
- v prostoru \mathbb{R}^2 je podle poznámky za 15.1.11 její míra 0.

Všechny známé plochy obrazců a objemy těles vyjadřují příslušnou Jordanovu míru.

Míru m na prostoru \mathbb{R}^k se nazývá *aditivní*, má-li následující vlastnost: Jsou-li množiny A_1, A_2, \dots, A_m měřitelné a po dvou disjunktní, pak i množina $A = \bigcup_{i=1}^m A_i$ je měřitelná a platí

$$m(A) = \sum_{i=1}^m m(A_i).$$

Jordanova míra je podle 15.1.10.2 aditivní.

Kapitola 16

Riemannův integrál funkcí n proměnných

16.1 Riemannův integrál

16.1.1 Definice

Budte $i_1, i_2, \dots, i_k \in \mathbb{Z}$. Množinu

$$C_{i_1, i_2, \dots, i_k}^n = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_k) \in \mathbb{R}^k : \frac{i_1}{2^n} \leq x_1 < \frac{i_1 + 1}{2^n}, \dots, \frac{i_k}{2^n} \leq x_k < \frac{i_k + 1}{2^n} \right\}$$

nazýváme *krychlová množina řádu n* .

Krychlová množina řádu n se liší od krychle řádu n tím, že není uzavřená. Krychlové množiny pokrývají celý prostor \mathbb{R}^k a jsou po dvou disjunktní, tj. každý bod $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^k$ je prvkem právě jedné z nich.

Každá krychlová množina řádu n je měřitelná a její míra je $m(C^n) = \frac{1}{2^{kn}}$, sr. 15.1.12, 15.1.13.

16.1.2 Definice

Bud $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina a budte $C_1^n, C_2^n, \dots, C_m^n$ všechny krychlové množiny řádu n takové, že $D_1^n = C_1^n \cap A \neq \emptyset, \dots, D_m^n = C_m^n \cap A \neq \emptyset$. Systém množin $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ nazveme *pokrytím řádu n množiny A* .

Každá z množin D_j^n je podle 15.1.13 měřitelná, neboť je průnikem dvou měřitelných množin. Míra množiny A je podle 15.1.14 rovna

$$m(A) = \sum_{j=1}^m m(D_j^n).$$

Jsou-li $p, q \in \mathbb{N}$, $p < q$, je pokrytí \mathcal{S}_q *zjemněním* pokrytí \mathcal{S}_p v tom smyslu, že ke každé množině $D^q \in \mathcal{S}_q$ existuje množina $D^p \in \mathcal{S}_p$ tak, že $D^q \subseteq D^p$.

16.1.3 Definice

Bud $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina, $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ ohraničená funkce a $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Označme

$$\alpha_j = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \beta_j = \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}.$$

Pak číslo

$$s_n(A, f) = \sum_{j=1}^m \alpha_j m(D_j^n) \quad \text{resp.} \quad S_n(A, f) = \sum_{j=1}^m \beta_j m(D_j^n)$$

nazýváme *dolní*, resp. *horní*, *součet řádu n příslušný k množině A a funkci f* .

Poněvadž $\alpha_j \leq \beta_j$, $j = 1, 2, \dots, m$, platí $s_n(A, f) \leq S_n(A, f)$.

16.1.4 Věta

Posloupnost $\{s_n(A, f)\}_{n=1}^{\infty}$ je neklesající, posloupnost $\{S_n(A, f)\}_{n=1}^{\infty}$ je nerostoucí.

D.: Necht $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$, $\mathcal{S}_{n+1} = \{D_1^{n+1}, D_2^{n+1}, \dots, D_l^{n+1}\}$.

Ke každému $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ vybereme z pokrytí \mathcal{S}_{n+1} ty prvky, které jsou podmnožinou množiny D_k^n .

Označíme je $D_{k_1}^{n+1}, D_{k_2}^{n+1}, \dots, D_{k_h}^{n+1}$, tj. $D_k^n = \bigcup_{j=1}^h D_{k_j}^{n+1}$. Pak

$$\alpha_k = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_k^n\} \leq \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_{k_j}^{n+1}\}$$

pro každé $j \in \{1, 2, \dots, h\}$, neboť $D_{k_j}^{n+1} \subseteq D_k^n$. Označme $\tilde{\alpha}_{k_j} = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_{k_j}^{n+1}\}$. Platí

$$\alpha_k m(D_k^m) = \alpha_k \sum_{j=1}^h m(D_{k_j}^{n+1}) \leq \sum_{j=1}^h \tilde{\alpha}_{k_j} m(D_{k_j}^{n+1}).$$

Sečtením těchto rovnic pro $k = 1, 2, \dots, m$ dostaneme $s_n(A, f) \leq s_{n+1}(A, f)$, což je první tvrzení. Druhé dokážeme analogicky. \square

16.1.5 Věta

Pro všechna $p, q \in \mathbb{N}$ platí $s_p(A, f) \leq S_q(A, f)$.

D.: Je-li $p \leq q$, pak $s_p(A, f) \leq s_q(A, f) \leq S_q(A, f)$, je-li $p > q$, pak $S_q(A, f) \geq S_p(A, f) \geq s_p(A, f)$. \square

16.1.6 Důsledek

Pro všechna $p, q \in \mathbb{N}$ platí $s_1(A, f) \leq s_p(A, f) \leq S_q(A, f) \leq S_1(A, f)$.

Tvrzení 16.1.4 a 16.1.6 říkají, že posloupnosti $\{s_n(A, f)\}_{n=1}^{\infty}$, $\{S_n(A, f)\}_{n=1}^{\infty}$ jsou monotonní a ohraničené. Tato skutečnost spolu s 1.3.9 nás opravňuje k následující definici.

16.1.7 Definice

Bud $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina, $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ ohraničená funkce. Definujme *dolní*, resp. *horní*, *integrál z funkce f přes množinu A* jako

$$\int_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(A, f), \quad \text{resp.} \quad \overline{\int}_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n(A, f).$$

Je-li $\int_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \overline{\int}_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$, řekneme, že *funkce f je na množině A integrovatelná (integrabilní) v Riemannově smyslu*. Společnou hodnotu horního a dolního integrálu nazýváme *Riemannovým integrálem z funkce f přes množinu A*. Značíme jej $\int_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$; podrobněji $\int_A \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_k) dx_1 dx_2 \dots dx_k$ nebo v případě $k = 2$

$$\iint_A f(x, y) dx dy.$$

16.1.8 Poznámka

Uvedená definice je v souladu s definicí 5.1.6.

D.: Necht $k = 1$, $A = [a, b]$.

Necht funkce f je integrovatelná podle definice 16.1.7. Položme

$$D_n = \left([a, b] \cap \left\{ \frac{i}{2^n} : i \in \mathbb{Z} \right\} \right) \cup \{a, b\}.$$

Pak D_n je dělením uzavřeného intervalu $[a, b]$, $D_n \in \vartheta([a, b])$ a $\{D_n\}_{n=1}^{\infty}$ je nulová posloupnost dělení intervalu $[a, b]$. Podle 5.1.9 tedy platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s(D_n, f) = \int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} S(D_n, f).$$

Avšak $s(D_n, f) = s_n([a, b], f)$, $S(D_n, f) = S_n([a, b], f)$, jak vidíme porovnáním definic 5.1.2 a 16.1.3, tedy

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n([a, b], f) = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n([a, b], f),$$

což znamená, že funkce f je integrovatelná i podle definice 16.1.7.

Nechť je nyní funkce f integrovatelná podle definice 16.1.7. Poněvadž

$$\{s_n([a, b], f) : n \in \mathbb{N}\} \subseteq \{s(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\},$$

platí

$$\begin{aligned} \int_{[a,b]} f(x) dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} s_n([a, b], f) = \sup \{s_n([a, b], f) : n \in \mathbb{N}\} \leq \\ &\leq \sup \{s(D, f) : D \in \vartheta([a, b])\} = \int_a^b f(x) dx. \end{aligned}$$

Analogicky ukážeme platnost nerovnosti

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_{[a,b]} f(x) d(x),$$

takže celkem máme

$$\int_{[a,b]} f(x) d(x) \leq \int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b f(x) dx \leq \int_{[a,b]} f(x) d(x).$$

Odtud plyne $\int_a^b f(x) dx = \int_{[a,b]} f(x) d(x)$, takže funkce f je integrovatelná i podle definice 5.1.6. \square

16.1.9 Příklady

1. Funkce konstantní na měřitelné množině $A \subseteq \mathbb{R}^k$, tj. $f(x) = \alpha$ pro $x \in A$, je integrovatelná na A a platí $\int_A f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \alpha m(A)$.

D.: Je-li $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A , pak

$$\int_A \alpha d\mathbf{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(A, f) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \alpha m(D_j^n) = \alpha \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n m(D_j^n) = \alpha m(A).$$

Analogicky $\int_A \alpha d\mathbf{x} = \alpha m(A)$. \square

2. Buď $k = 2$, $A = [0, 1] \times [0, 1]$, $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x, y) = \begin{cases} 1, & x \in \mathbb{Q}, y \in \mathbb{Q} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$. Pak funkce f není integrovatelná, neboť

$$s_n(A, f) = \sum_{j=1}^{4^n} 0 \cdot \frac{1}{4^n} = 0, \quad S_n(A, f) = \sum_{j=1}^{4^n} 1 \cdot \frac{1}{4^n} = 1.$$

16.2 Vlastnosti Riemannova integrálu

Všechny funkce uvažované v tomto odstavci jsou funkcemi k proměnných, tj. $\mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$. Množinami rozumíme podmnožiny prostoru \mathbb{R}^k .

16.2.1 Věta (aditivita integrálu vzhledem k integrovaným funkcím)

Jsou-li funkce f a g integrovatelné na množině A , pak také funkce $f + g$ je integrovatelná na A a platí

$$\int_A (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

D.: Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Označme

$$u_j = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad v_j = \inf \{g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad w_j = \inf \{f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}.$$

Pak je $u_j + v_j \leq f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})$ pro každé $\mathbf{x} \in D_j^n$, tedy $u_j + v_j \leq w_j$. Odtud dostaneme

$$u_j m(D_j^n) + v_j m(D_j^n) \leq w_j m(D_j^n).$$

Sečtením těchto rovností pro $j = 1, 2, \dots, m$ dostaneme $s_n(A, f) + s_n(A, g) \leq s_n(A, f + g)$ a tedy podle

1.3.5.1 je $\int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \leq \int_A (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x}$.

Analogicky ukážeme, že $\int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \leq \int_A (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x}$.

Celkem máme

$$\begin{aligned} \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} &= \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \leq \int_A (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x} \leq \\ &\leq \int_A (f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x} \leq \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \end{aligned}$$

□

16.2.2 Věta (homogenita integrálu vzhledem k integrovaným funkcím)

Je-li funkce f integrovatelná na množině $A \subseteq \mathbb{R}^k$ a $c \in \mathbb{R}$ je konstanta, pak také funkce cf je integrovatelná na A a platí

$$\int_A cf(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

D.: Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Označme

$$u_j = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad v_j = \inf \{cf(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\},$$

$$U_j = \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad V_j = \sup \{cf(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}.$$

Nechť nejprve $c \geq 0$. Pak $cu_j = v_j$, $cU_j = V_j$, takže $s_n(A, cf) = cs_n(A, f)$, $S_n(A, cf) = cS_n(A, f)$. Odtud plyne

$$\int_A cf(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}, \quad \int_A cf(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

Pokud $c < 0$, pak $cu_j = V_j$, $cU_j = v_j$, takže $s_n(A, cf) = cS_n(A, f)$, $S_n(A, cf) = cs_n(A, f)$. Odtud plyne

$$\int_A cf(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}, \quad \int_A cf(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = c \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

□

16.2.3 Důsledek (linearita integrálu)

Budte $c_1, c_2, \dots, c_m \in \mathbb{R}$ konstanty a f_1, f_2, \dots, f_m funkce integrovatelné na měřitelné množině A . Pak je i funkce $c_1 f_1 + c_2 f_2 + \dots + c_m f_m$ integrovatelná na množině A a platí

$$\int_A (c_1 f_1(\mathbf{x}) + c_2 f_2(\mathbf{x}) + \dots + c_m f_m(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x} = c_1 \int_A f_1(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + c_2 \int_A f_2(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} + \dots + c_m \int_A f_m(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

D.: Úplnou indukcí s využitím 16.2.1 a 16.2.2. \square

16.2.4 Věta (monotonie integrálu vzhledem k integrovaným funkcím)

Jsou-li funkce f, g integrovatelné na měřitelné množině A a platí-li $f(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x})$ pro každé $\mathbf{x} \in A$, pak

$$\int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \leq \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

D.: Podle 16.2.3 je funkce $g - f$ integrovatelná na množině A . Poněvadž $g(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x}) \geq 0$ pro každé $\mathbf{x} \in A$, je každý dolní součet $s_n(A, g - f) \geq 0$. Odtud plyne

$$0 \leq \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(A, g - f) = \int_A (g(\mathbf{x}) - f(\mathbf{x})) \, d\mathbf{x} = \int_A g(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

\square

16.2.5 Věta

Je-li funkce f integrovatelná na měřitelné množině A , pak je i funkce $|f|$ integrovatelná na množině A a platí

$$\left| \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \right| \leq \int_A |f(\mathbf{x})| \, d\mathbf{x}.$$

D.: Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Položme

$$u_j = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad U_j = \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \\ v_j = \inf \{|f(\mathbf{x})| : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \quad V_j = \sup \{|f(\mathbf{x})| : \mathbf{x} \in D_j^n\}.$$

Budte $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in D_j^n$. Pak je

$$|f(\mathbf{x}_1) - f(\mathbf{x}_2)| \leq U_j - u_j, \\ |f(\mathbf{x}_1)| = |f(\mathbf{x}_1) - f(\mathbf{x}_2) + f(\mathbf{x}_2)| \leq |f(\mathbf{x}_1) - f(\mathbf{x}_2)| + |f(\mathbf{x}_2)| \leq U_j - u_j + |f(\mathbf{x}_2)|.$$

Nechť \mathbf{x}_2 je zvoleno libovolně ale pevně. Poslední nerovnost platí pro každé $\mathbf{x}_1 \in D_j^n$ a tedy

$$V_j \leq U_j - u_j + |f(\mathbf{x}_2)|.$$

Poslední nerovnost platí pro každé $\mathbf{x}_2 \in D_j^n$ a tedy platí $V_j \leq U_j - u_j + v_j$, neboli $V_j - v_j \leq U_j - u_j$. Odtud plyne

$$0 \leq S_n(A, |f|) - s_n(A, |f|) = \sum_{j=1}^m V_j m(D_j^n) - \sum_{j=1}^m v_j m(D_j^n) = \sum_{j=1}^m (V_j - v_j) m(D_j^n) \leq \\ \leq \sum_{j=1}^m (U_j - u_j) m(D_j^n) = S_n(A, f) - s_n(A, f) \rightarrow 0$$

pro $n \rightarrow \infty$ a tedy funkce $|f|$ je integrovatelná.

Z nerovnosti $-|f| \leq f \leq |f|$ a z věty 16.2.5 plyne

$$-\int_A |f(\mathbf{x})| \, d\mathbf{x} \leq \int_A f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \leq \int_A |f(\mathbf{x})| \, d\mathbf{x},$$

což je dokazovaná nerovnost. \square

16.2.6 Věta

Jsou-li funkce f, g integrovatelné na měřitelné množině A , pak je i funkce fg integrovatelná na množině A .

D.: Nechť nejprve jsou obě funkce nezáporné na množině A . Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Označme

$$\begin{aligned} u_j &= \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, & U_j &= \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \\ v_j &= \inf \{g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, & V_j &= \sup \{g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \\ w_j &= \inf \{f(\mathbf{x})g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, & W_j &= \sup \{f(\mathbf{x})g(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\}, \end{aligned}$$

Pak je $u_j v_j \leq w_j \leq W_j \leq U_j V_j$. Odtud

$$W_j - w_j \leq U_j V_j - u_j v_j = U_j V_j - V_j u_j + u_j V_j - u_j v_j = V_j(U_j - u_j) + u_j(V_j - v_j).$$

Poněvadž funkce f, g jsou ohraničené na množině A , existuje $\alpha > 0$ tak, že $|f(\mathbf{x})| < \alpha$, $|g(\mathbf{x})| < \alpha$ pro $\mathbf{x} \in A$. Tedy $W_j - w_j < \alpha(U_j - u_j) + \alpha(V_j - v_j) = \alpha(U_j - u_j + V_j - v_j)$.

Odtud plyne $0 \leq S_n(A, fg) - s_n(A, fg) \leq \alpha(S_n(A, f) - s_n(A, f) + S_n(A, g) - s_n(A, g))$. Pravá strana pro $n \rightarrow \infty$ konverguje k 0, z čehož vyplyne tvrzení.

Vynechejme nyní předpoklad, že funkce f, g jsou na množině A nezáporné. Poněvadž jsou omezené, existuje číslo $\beta > 0$ takové, že funkce $\beta - f, \beta - g$ jsou nezáporné. Tyto funkce jsou podle 16.2.3 integrovatelné a tedy podle již dokázaného tvrzení, příkladu 16.1.9.1 a důsledku 16.2.3 také funkce

$$(\beta - f)(\beta - g) - \beta^2 - \beta(f + g) = fg$$

je integrovatelná. \square

16.2.7 Věta (o střední hodnotě)

Buďte f, g funkce integrovatelné na měřitelné množině A takové, že $\alpha \leq f(\mathbf{x}) \leq \beta$, $0 \leq g(\mathbf{x})$ pro $\mathbf{x} \in A$. Pak existuje konstanta μ , $\alpha \leq \mu \leq \beta$ taková, že

$$\int_A f(\mathbf{x})g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \mu \int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

D.: Pro $\mathbf{x} \in A$ platí: $\alpha g(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x})g(\mathbf{x}) \leq \beta g(\mathbf{x})$.

Podle 16.2.6 je funkce fg integrovatelná na množině A ; podle 16.2.4 platí:

$$\alpha \int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x} \leq \int_A f(\mathbf{x})g(\mathbf{x})d\mathbf{x} \leq \beta \int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

Je-li $\int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = 0$, pak také $\int_A f(\mathbf{x})g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = 0$ a za μ lze vzít libovolné číslo. Je-li $\int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x} > 0$, položíme

$$\mu = \frac{\int_A f(\mathbf{x})g(\mathbf{x})d\mathbf{x}}{\int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x}}.$$

\square

16.2.8 Věta (monotonie integrálu vzhledem k integračnímu oboru)

Je-li funkce f integrovatelná na množině A , pak je integrovatelná na každé měřitelné podmnožině $B \subseteq A$.

D.: Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Pak $\{D_1^n \cap B, D_2^n \cap B, \dots, D_m^n \cap B\}$ je pokrytí řádu n množiny B a

$\{D_1^n \cap (A \setminus B), D_2^n \cap (A \setminus B), \dots, D_m^n \cap (A \setminus B)\}$ je pokrytí řádu n množiny $A \setminus B$.
Pro příslušné horní a dolní součty platí

$$s_n(A, f) \leq s_n(B, f) + s_n(A \setminus B, f), \quad S_n(A, f) \geq S_n(B, f) + S_n(A \setminus B, f).$$

Limitním přechodem $n \rightarrow \infty$ dostaneme

$$\int_{\overline{B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_{\overline{A \setminus B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} \geq \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} \geq \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_{\overline{A \setminus B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x},$$

neboli

$$0 \geq \int_{\overline{B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x} \geq \int_{\overline{A \setminus B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} - \int_{\overline{A \setminus B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} \geq 0,$$

což je možné jen tak, že $\int_{\overline{B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x}$, $\int_{\overline{A \setminus B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_{A \setminus B} f(\mathbf{x})d\mathbf{x}$. \square

16.2.9 Věta (aditivita integrálu vzhledem k integračnímu oboru)

Buďte A, B disjunktní měřitelné množiny, f funkce integrovatelná na množině A i na množině B . Pak je funkce f integrovatelná také na množině $A \cup B$ a platí

$$\int_{A \cup B} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

D.: Poněvadž obě množiny A i B jsou měřitelné, je podle 15.1.14 také množina $A \cup B$ měřitelná.

Poněvadž funkce f je ohraničená na množině A i na množině B , je ohraničená i na sjednocení množin $A \cup B$. Označme $\alpha = \sup \{|f(\mathbf{x})| : \mathbf{x} \in A \cup B\}$.

Buď $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny $A \cup B$. Dále necht' jsou

$D_1^n, D_2^n, \dots, D_p^n$ všechny prvky pokrytí \mathcal{S}_n takové, že jsou současně prvky pokrytí řádu n množiny A ,
 $D_{p+1}^n, D_{p+2}^n, \dots, D_q^n$ všechny prvky pokrytí \mathcal{S}_n takové, že jsou současně prvky pokrytí řádu n množiny B ,
 $D_{q+1}^n, D_{q+2}^n, \dots, D_m^n$ ostatní prvky pokrytí \mathcal{S}_n .

Každá z množin $D_{q+1}^n, D_{q+2}^n, \dots, D_m^n$ má neprázdný průnik jak s množinou A tak i s množinou B , každá z nich obsahuje některé hraniční body společné množinám A a B .

Buď H množina všech hraničních bodů společných množinám A a B . Množina H je průnikem hranic dvou měřitelných množin, tedy podle 15.1.12 průnikem dvou množin nulové míry, takže podle 15.1.13 a 15.1.10.1 je sama měřitelná a její míra je $m(H) = 0$.

Poněvadž $D_{q+1}^n \cup D_{q+2}^n \cup \dots \cup D_m^n \subseteq \mathcal{C}(H)$, platí také

$$\lim_{n \rightarrow \infty} m(D_{q+1}^n \cup D_{q+2}^n \cup \dots \cup D_m^n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=q+1}^m m(D_i^n) = 0.$$

Nyní platí

$$\begin{aligned} |S_n(A \cup B, f) - (S_n(A, f) + S_n(B, f))| &= \left| \sum_{i=q+1}^m \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_i^m\} m(D_i^m) \right| \leq \\ &\leq \sum_{i=q+1}^m |\sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_i^m\}| m(D_i^m) \leq \alpha \sum_{i=q+1}^m m(D_i^m) \rightarrow 0 \end{aligned}$$

pro $n \rightarrow \infty$. To znamená, že

$$\int_{\overline{A \cup B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

Analogicky lze ukázat, že

$$\int_{\overline{A \cup B}} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

\square

16.2.10 Věta

Buď f funkce ohraničená na množině A míry nula. Pak je funkce f na množině A integrovatelná a platí $\int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = 0$.

D.: Buď $|f(\mathbf{x})| \leq \alpha$ pro $\mathbf{x} \in A$, $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ pokrytí řádu n množiny A . Pak je

$$\begin{aligned} -\alpha \sum_{j=1}^m m(D_j^n) &\leq \sum_{j=1}^m m(D_j^n) \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\} = s_n(A, f) \leq \\ &\leq S_n(A, f) = \sum_{j=1}^m m(D_j^n) \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D_j^n\} \leq \alpha \sum_{j=1}^m m(D_j^n), \end{aligned}$$

a poněvadž $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^m m(D_j^n) = m(A) = 0$, máme tvrzení věty. \square

16.2.11 Důsledek

Buďte A, B měřitelné množiny takové, že jejich průnik je měřitelný a platí $m(A \cap B) = 0$. Je-li funkce f integrovatelná na množině A i na množině B , pak je integrovatelná také na množině $A \cup B$ a platí

$$\int_{A \cup B} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

D.: Plyne z 16.2.9 a 16.2.10, neboť $A \cup B = (A \setminus B) \cup (A \cap B) \cup (B \setminus A)$, přičemž sjednocení na pravé straně je disjunktní. \square

16.2.12 Věta

Je-li ohraničená funkce f spojitá na měřitelné množině A , pak je na množině A integrovatelná.

D.: Je-li $m(A) = 0$, tvrzení plyne z 16.2.10.

Nechť $m(A) > 0$ a buď $\alpha > 0$ takové číslo, že $|f(\mathbf{x})| < \alpha$ pro $\mathbf{x} \in A$. Dále buď $\varepsilon \in (0, 4\alpha m(A))$ libovolné číslo.

Poněvadž $m(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(\mathcal{K}_n(A))$, existuje jádro $B = \mathcal{K}_{n_0}(A)$ takové, že $m(B) > m(A) - \frac{\varepsilon}{4\alpha}$, tedy $m(A \setminus B) = m(A) - m(B) < m(A) - m(A) + \frac{\varepsilon}{4\alpha} = \frac{\varepsilon}{4\alpha}$.

Množina B je uzavřená a ohraničená, tedy podle 11.4.8 kompaktní. Podle 11.5.8 je funkce f na množině B spojitá stejnoměrně. To znamená, že ke zvolenému kladnému číslu ε existuje číslo δ takové, že pro libovolné body $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in B$, $\rho(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) < \delta$ (ρ označuje některou metriku ekvivalentní s euklidovskou) platí

$$|f(\mathbf{x}_1) - f(\mathbf{x}_2)| \leq \frac{\varepsilon}{2m(B)}. \quad (16.1)$$

Buď $n_1 \in \mathbb{N}$ takové číslo, že pro $n > n_1$ je průměr krychle W^n řádu n menší než δ . Pak předchozí nerovnost platí na libovolné krychli $W^n \subseteq B$ pro libovolné $n > n_1$.

Označme B_0 množinu, kterou dostaneme z jádra množiny B , když v něm každou krychli W^n nahradíme krychlovou množinou C^n , $B_0 = \bigcup_{j=1}^m C_j^n$. Označme dále

$$u_j = \inf \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in C_j^n\}, \quad U_j = \sup \{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in C_j^n\}.$$

Z nerovnosti (16.1) plyne, že $U_j - u_j \leq \frac{\varepsilon}{2m(B)}$, a tedy pro $n > n_1$ platí

$$0 \leq S_n(B_0, f) - s_n(B_0, f) = \sum_{j=1}^m (U_j - u_j)m(C_j^n) \leq \frac{\varepsilon}{2m(B)} \sum_{j=1}^m m(C_j^n) = \frac{\varepsilon}{2},$$

neboť $m(B) = m(B_0) = \sum_{j=1}^m m(C_j^n)$. Celkem pro $n > \max\{n_0, n_1\}$ dostáváme

$$0 \leq S_n(A, f) - s_n(A, f) = S_n(B_0, f) + S_n(A \setminus B_0, f) - s_n(B_0, f) - s_n(A \setminus B_0, f) \leq \frac{\varepsilon}{2} + 2\alpha m(A \setminus B_0) < \frac{\varepsilon}{2} + 2\alpha \frac{\varepsilon}{4\alpha} = \varepsilon,$$

což znamená, že funkce f je na množině A integrovatelná. \square

16.2.13 Definice

Řekneme, že funkce $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ má *skoro všude na množině A vlastnost \mathcal{V}* , jestliže existuje podmnožina $B \subseteq A$ taková, že $m(B) = 0$ a funkce f má vlastnost \mathcal{V} ve všech bodech množiny $A \setminus B$.

Příklad: Funkce

$$f(x, y) = \begin{cases} n, & \frac{1}{n+1} < x^2 + y^2 \leq \frac{1}{n}, n \in \mathbb{N} \\ 0, & x^2 + y^2 > 1 \end{cases}$$

je spojitá skoro všude na \mathbb{R}^2 . Přitom je nespojitá v každém bodě každé z kružnic $\{(x, y) : x^2 + y^2 = \frac{1}{n}\}$, $n \in \mathbb{N}$ a v bodě $(0, 0)$ dokonce není definována.

16.2.14 Věta

Je-li funkce f ohraničená na měřitelné množině A a skoro všude na množině A je $f(\mathbf{x}) = 0$, pak je funkce f na množině A integrovatelná a platí $\int_A f(\mathbf{x}) dx = 0$.

D.: Buď $B = \{\mathbf{x} \in A : f(\mathbf{x}) \neq 0\}$. Podle předpokladu je $m(B) = 0$ a tedy podle 16.2.10 je $\int_B f(\mathbf{x}) dx = 0$.

Na množině $A \setminus B$, která je podle 15.1.13 měřitelná, je $f(\mathbf{x}) = 0$ a tedy podle 16.1.9 je $\int_{A \setminus B} f(\mathbf{x}) dx = 0$.

Podle 16.2.9 nyní je $\int_A f(\mathbf{x}) dx = \int_B f(\mathbf{x}) dx + \int_{A \setminus B} f(\mathbf{x}) dx = 0$. \square

16.2.15 Věta

Nechť nezáporná funkce f je integrovatelná na měřitelné množině A a platí $\int_A f(\mathbf{x}) dx = 0$. Pak $f(\mathbf{x}) dx = 0$ skoro všude na množině A .

D.: Buď $B = \{\mathbf{x} \in A : f(\mathbf{x}) > 0\}$ a připusťme, že $m(B) > 0$. Kdyby pro každé přirozené číslo n a každou krychli W^n řádu n platilo, že $W^n \cap (\mathbb{R}^k \setminus B^\circ) \neq \emptyset$, pak by jádro $\mathcal{K}_n(B)$ řádu n množiny B bylo prázdné pro každé $n \in \mathbb{N}$ a platilo by $m_*(B) = 0$. To by byl spor s předpokladem $m(B) > 0$. Existuje tedy číslo n_1 a krychle $W_{\mathbf{m}}^{n_1}$ řádu n_1 tak, že $W_{\mathbf{m}}^{n_1} \subseteq \mathcal{K}_{n_1}(B)$.

Množina $W_{\mathbf{m}}^{n_1}$ je podle 11.4.8 kompaktní a tedy podle 11.5.4 existuje $\alpha_{\mathbf{m}} = \min\{f(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in W_{\mathbf{m}}^{n_1}\}$. Je $\alpha_{\mathbf{m}} > 0$, neboť v opačném případě by $W_{\mathbf{m}}^{n_1} \cap \overline{\mathbb{R}^k \setminus B} = \emptyset$, což by bylo ve sporu s inkluzí $W_{\mathbf{m}}^{n_1} \subseteq B^\circ$. Nyní podle 16.2.4, 16.2.8 a 16.2.11 platí

$$0 = \int_A f(\mathbf{x}) dx = \int_{W_{\mathbf{m}}^{n_1}} f(\mathbf{x}) dx + \int_{A \setminus W_{\mathbf{m}}^{n_1}} f(\mathbf{x}) dx \geq \alpha_{\mathbf{m}} m(W_{\mathbf{m}}^{n_1}) = \alpha_{\mathbf{m}} \frac{1}{2^{kn_1}} > 0,$$

což je spor. \square

Poznámka: Analogické tvrzení platí i pro nekladnou funkci.

16.2.16 Věta

Je-li funkce f integrovatelná na měřitelné množině A a funkce g je ohraničená na A a skoro všude na A platí $f(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x})$. Pak funkce g je integrovatelná na množině A a platí $\int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x}$.

D.: Buď $B \subseteq A$ taková, že $m(B) = 0$ a $f(\mathbf{x}) \neq g(\mathbf{x})$ pro $\mathbf{x} \in B$. Pak s využitím 16.2.9 a 16.2.10 dostaneme

$$\int_A g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_B g(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_{A \setminus B} g(\mathbf{x})d\mathbf{x} = 0 + \int_{A \setminus B} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_B f(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_{A \setminus B} f(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \int_A f(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$

□

16.2.17 Věta

Je-li funkce f ohraničená na měřitelné množině A a skoro všude na A spojitá, pak je funkce f na množině A integrovatelná.

D.: Označme B množinu bodů nespojitosti funkce f . Podle předpokladu je B měřitelná a podle 15.1.14 je $m(A \setminus B) = m(A) - m(B) = m(A)$.

Funkce f je na množině $A \setminus B$ podle 16.2.12 integrovatelná a na množině B je integrovatelná podle 16.2.10.

Podle 16.2.9 je tedy f integrovatelná na množině $A = (A \setminus B) \cup B$. □

16.3 Fubiniova věta

Buďte $p, q \in \mathbb{N}$, $p + q = k$. Prostor \mathbb{R}^k lze chápat jako součin prostorů $\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$. Je-li $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^k$, pak $\mathbf{z} = (\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (x_1, x_2, \dots, x_p, y_1, y_2, \dots, y_q)$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q$.

16.3.1 Definice

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^k$. Definujeme množiny

$$A_{\mathbf{x}} = \{\mathbf{y} \in \mathbb{R}^q : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in A\} \text{ — řez množinou } A \text{ pro konstantní } \mathbf{x},$$

$$A_{\mathbf{x}}^{\perp} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p : \text{existuje } \mathbf{y} \in \mathbb{R}^q, \text{ že } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in A\} \text{ — průmět množiny } A \text{ do prostoru } \mathbb{R}^p.$$

Označení: $m_p(B)$, resp. $m_q(C)$ — míra množiny $B \subseteq \mathbb{R}^p$, resp. $C \subseteq \mathbb{R}^q$, v prostoru \mathbb{R}^p , resp. \mathbb{R}^q .
Pro $A \subseteq \mathbb{R}^k$ je $m(A) = m_k(A)$.

16.3.2 Věta (Guido Fubini, 1879–1943)

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina, $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ funkce integrovatelná na množině A . Buďte $p, q \in \mathbb{N}$, $p + q = k$. Označme $\mathbf{z} = (\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (x_1, x_2, \dots, x_p, y_1, y_2, \dots, y_q)$. Pak platí

$$\int_A f(\mathbf{z})d\mathbf{z} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{A_{\mathbf{x}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\overline{\int_{A_{\mathbf{x}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y}} \right) d\mathbf{x}.$$

D.: Buď nejprve A množina, která je sjednocením konečného počtu krychlových množin nultého řádu.

Pokrytím C_n je pro každé $n \in \mathbb{N}$ konečný počet krychlových množin řádu n . Každou krychlovou množinu $Z_{\mathbf{i}, \mathbf{j}}^n$, $\mathbf{i} \in I$, $\mathbf{j} \in J$ řádu n v \mathbb{R}^k lze považovat za kartézský součin $Z_{\mathbf{i}, \mathbf{j}}^n = X_{\mathbf{i}}^n \times Y_{\mathbf{j}}^n$ krychlových množin $X_{\mathbf{i}}^n$ řádu n v \mathbb{R}^p a $Y_{\mathbf{j}}^n$ řádu n v \mathbb{R}^q . Přitom $\frac{1}{2^{kn}} = m(Z_{\mathbf{i}, \mathbf{j}}^n) = m(X_{\mathbf{i}}^n) m(Y_{\mathbf{j}}^n) = \frac{1}{2^{pn}} \frac{1}{2^{qn}}$. Zvolme $\xi \in A_{\mathbf{x}}^{\perp}$, kde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p$ a uvažujme funkci $f(\xi, \cdot) : A_{\xi} \rightarrow \mathbb{R}$ danou předpisem $\mathbf{y} \mapsto f(\xi, \mathbf{y})$. Položme

$$F(\mathbf{x}) = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y}, \quad G(\mathbf{x}) = \overline{\int_{A_{\mathbf{x}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y})d\mathbf{y}}.$$

Pak je

$$F(\xi) \geq s_n(A_\xi, f(\xi, \cdot)) = \sum_{j \in J} \inf \{f(\xi, \mathbf{y}) : \mathbf{y} \in Y_j^n\} m_q(Y_j^n).$$

Poněvadž pro $\xi \in X_i^n$ platí $\inf \{f(\xi, \mathbf{y}) : \mathbf{y} \in Y_j^n\} \geq \inf \{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in Z_{i,j}^n\}$, platí také nerovnost

$$F(\xi) \geq \sum_{j \in J} \inf \{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in Z_{i,j}^n\} m(Y_j^n).$$

Odtud plyne

$$\inf \{F(\xi) : \xi \in X_i^n\} \geq \sum_{j \in J} \inf \{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in Z_{i,j}^n\} m_q(Y_j^n),$$

takže

$$\begin{aligned} s_n(A_x^\perp, F) &\geq \sum_{i \in I} \left(\sum_{j \in J} \inf \{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in Z_{i,j}^n\} m_q(Y_j^n) \right) m_q(X_i^n) = \\ &= \sum_{(i,j) \in I \times J} \inf \{f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in Z_{i,j}^n\} m(Z_{i,j}^n) = s_n(A, f). \end{aligned}$$

Odtud limitním přechodem pro $n \rightarrow \infty$ dostaneme nerovnost

$$\int_{A_x^\perp} F(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \geq \int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z}.$$

Analogickým způsobem dokážeme nerovnost

$$\int_{A_x^\perp} G(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \leq \int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z}.$$

Poněvadž $F(\mathbf{x}) \leq G(\mathbf{x})$ pro každé $\mathbf{x} \in A_x^\perp$, platí pro tato \mathbf{x} nerovnosti

$$\int_{A_x^\perp} G(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \geq \int_{A_x^\perp} F(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \geq \int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z} \geq \int_{A_x^\perp} G(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \geq \int_{A_x^\perp} F(\mathbf{x}) d\mathbf{x},$$

z nichž plyne integrovatelnost funkcí F , G i dokazovaná rovnost.

Buď nyní $A \subseteq \mathbb{R}^k$ libovolná měřitelná množina a W množina popsaná v první části důkazu a obsahující množinu A . Definujme funkci g předpisem

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}), & (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in A, \\ 0, & (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in W \setminus A. \end{cases}$$

Podle 15.1.13 je i $W \setminus A$ měřitelná množina a podle předchozí části důkazu, podle 16.2.10 a 16.2.9 je funkce g integrovatelná na množině A i na množině $W \setminus A$. Proto platí

$$\int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = \int_A g(\mathbf{z}) d\mathbf{z} + \int_{W \setminus A} g(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = \int_W g(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = \int_{W_x^\perp} \left(\int_{\overline{W_x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{W_x^\perp} \left(\int_{\overline{W_x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x}.$$

Dále je

$$\int_{W_x^\perp} \left(\int_{\overline{W_x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{A_x^\perp \cup (W_x^\perp \setminus A_x^\perp)} \left(\int_{\overline{W_x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{A_x^\perp} \left(\int_{\overline{W_x}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x},$$

neboť pro každé $\mathbf{x} \in W_{\mathbf{x}}^{\perp} \setminus A_{\mathbf{x}}^{\perp}$ je $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$ a tedy podle 16.2.14 je $\int_{W_{\mathbf{x}}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} = 0$ pro tato \mathbf{x} .

Pokračujeme v úpravách

$$\int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{\overline{W_{\mathbf{x}}}} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{A_{\mathbf{x}} \cup (\overline{W_{\mathbf{x}}} \setminus A_{\mathbf{x}})} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{\overline{A_{\mathbf{x}}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x}.$$

Tím je dokázáno

$$\int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{\overline{A_{\mathbf{x}}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x}.$$

Analogicky dokážeme

$$\int_A f(\mathbf{z}) d\mathbf{z} = \int_{A_{\mathbf{x}}^{\perp}} \left(\int_{\overline{A_{\mathbf{x}}}} f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} \right) d\mathbf{x}.$$

□

16.3.3 Poznámky

1. Z toho, že funkce f je integrovatelná na množině $A \subseteq \mathbb{R}^k$, neplyne, že tato funkce je integrovatelná v \mathbb{R}^q na každé podmnožině množiny $A_{\mathbf{x}}$. Z věty 16.3.2 však plyne, že rozdíl horního a dolního integrálu je tak malý, že integrál z něho přes množinu $A_{\mathbf{x}}^{\perp}$ je nulový.
2. Ve větě 16.3.2 není podstatné to, že se za \mathbf{x} bere (x_1, x_2, \dots, x_p) , tj. prvních p souřadnic. Stejně bychom mohli volit libovolných p přirozených čísel $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_p \leq k$ a položit $\mathbf{x} = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_p})$.

16.3.4 Důsledky

1. Buďte φ, ψ funkce spojité na intervalu $[a, b]$, $\varphi(x) < \psi(x)$ pro každé $x \in (a, b)$. Nechť

$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, \varphi(x) \leq y \leq \psi(x)\}$$

je měřitelná množina. Buď $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ funkce spojitá. Pak je

$$\iint_A f(x, y) dx dy = \int_a^b \left(\int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} f(x, y) dy \right) dx.$$

D.: $A_x = [\varphi(x), \psi(x)]$, $A_x^{\perp} = [a, b]$. Funkce $f(x, \cdot)$ je na množině A_x ohraničená a spojitá, tedy podle 16.2.17 je integrovatelná. □

2. Buďte φ, ψ funkce spojité na intervalu $[a, b]$, $\varphi(x) < \psi(x)$ pro každé $x \in (a, b)$. Nechť množina $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, \varphi(x) \leq y \leq \psi(x)\}$ je měřitelná v \mathbb{R}^2 . Dále buďte Φ, Ψ funkce spojité na množině A takové, že $\Phi(x, y) < \Psi(x, y)$ pro každé $(x, y) \in A$. Nechť množina

$$\begin{aligned} B &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y) \in A, \Phi(x, y) \leq z \leq \Psi(x, y)\} = \\ &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : a \leq x \leq b, \varphi(x) \leq y \leq \psi(x), \Phi(x, y) \leq z \leq \Psi(x, y)\} \end{aligned}$$

je měřitelná v \mathbb{R}^3 . Buď f funkce spojitá na množině B . Pak je

$$\iiint_B f(x, y, z) dx dy dz = \int_a^b \left(\int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \left(\int_{\Phi(x, y)}^{\Psi(x, y)} f(x, y, z) dz \right) dy \right) dx.$$

D.:

$$\begin{aligned} \int_B f(x, y, z) dx dy dz &= \int_{B_{xy}^\perp} \left(\int_{B_{xy}} f(x, y, z) dz \right) dx dy = \int_{B_{xy}^\perp} \left(\int_{\Phi(x, y)}^{\Psi(x, y)} f(x, y, z) dz \right) dx dy = \\ &= \int_a^b \left(\int_{\varphi(x)}^{\psi(x)} \left(\int_{\Phi(x, y)}^{\Psi(x, y)} f(x, y, z) dz \right) dy \right) dx. \end{aligned}$$

□

16.4 Transformace integrálu

16.4.1 Heuristická úvaha

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina, $\mathcal{S}_n = \{D_1^n, D_2^n, \dots, D_m^n\}$ její pokrytí řádu n . Označme pro stručnost jednu libovolnou množinu z \mathcal{S}_n symbolem D a buď $\mathbf{u}_0 \in D$. Dále necht' $G : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$ je diferencovatelné zobrazení takové, že $G(\mathbf{u}_0) = \mathbf{x}_0$.

Definujme lineární zobrazení $\tilde{G} : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$ předpisem $\tilde{G}(\mathbf{u}) = \mathbf{x}_0 + G'(\mathbf{u}_0)(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0)$, kde G' značí Jacobiho matici zobrazení G (sr. 13.2.4). Pak \tilde{G} je nejlepší lineární aproximací zobrazení G (sr. 13.2.3). Je-li tedy množina D malá, budou se na ní zobrazení G a \tilde{G} lišit málo, $G(\mathbf{u}) \approx \tilde{G}(\mathbf{u})$ pro $\mathbf{u} \in D$ a tedy také bude

$$m(G(D)) \approx m(\tilde{G}(D)).$$

Podle 15.2.4 je $m(\tilde{G}(D)) = |\det G'(\mathbf{u}_0)| m(D) = |J(G(\mathbf{u}_0))| m(D)$, kde $J(G(\mathbf{u}_0))$ je Jacobián zobrazení G v bodě \mathbf{u}_0 .

Buď $f : G(A) \rightarrow \mathbb{R}$ spojitá funkce. Na malé množině $G(D)$ lze tuto funkci považovat za přibližně konstantní, $f(\mathbf{x}) \approx f(\mathbf{x}_0)$ pro $\mathbf{x} \in G(D)$; na malé množině D lze považovat za přibližně konstantní funkci $f \circ G |J(G)|$, $f(G(\mathbf{u})) |J(G(\mathbf{u}))| \approx f(G(\mathbf{u}_0)) |J(G(\mathbf{u}_0))|$ pro $\mathbf{u} \in D$. Platí tedy přibližné rovnosti

$$\int_{G(D)} f(\mathbf{x}) dx \approx f(\mathbf{x}_0) m(G(D)) \approx f(G(\mathbf{u}_0)) |J(G(\mathbf{u}_0))| m(D) \approx \int_D f(G(\mathbf{u})) |J(G(\mathbf{u}))| du.$$

Je-li zobrazení G na množině A prosté, tj. když platí $J(G(\mathbf{u})) \neq 0$ pro $\mathbf{u} \in A$ (podle 13.2.7), pak

$$G(A) = G(D_1^n) \cup G(D_2^n) \cup \dots \cup G(D_m^n)$$

a toto sjednocení je disjunktní. Tedy podle 16.2.9 a předchozí přibližné rovnosti platí

$$\int_{G(A)} f(\mathbf{x}) dx = \sum_{i=1}^n \int_{G(D_i^n)} f(\mathbf{x}) dx \approx \sum_{i=1}^n \int_{G(D_i^n)} f(G(\mathbf{u})) |J(G(\mathbf{u}_0))| du = \int_A f(G(\mathbf{u})) |J(G(\mathbf{u}))| du.$$

16.4.2 Věta (o transformaci integrálu)

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^k$ měřitelná množina, $G : A \rightarrow \mathbb{R}^k$ diferencovatelné zobrazení, f funkce integrovatelná na množině $G(A)$. Necht' existuje množina $P \subseteq A$ taková, že $m(P) = 0$ a že pro zobrazení G platí:

- 1) G je prosté na množině $M \setminus P$,
- 2) $J(G(\mathbf{u})) \neq 0$ na množině $M \setminus P$.

Pak je funkce $f \circ G$ integrovatelná na množině A a platí

$$\int_{G(A)} f(\mathbf{x}) dx = \int_A f(G(\mathbf{u})) |J(G(\mathbf{u}))| du.$$

D.: Viz např. M. Ráb: Riemannův integrál v \mathbb{E}^n , str. 70–74

nebo D. Krupka, J. Musilová: Integrální počet na euklidovských prostorech a diferencovatelných varietách, str. 75–79. □

16.4.3 Transformace integrálu v \mathbb{R}^2 do polárních souřadnic

Zobrazení $G : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ je dáno předpisem

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = G(r, \varphi) = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad \text{stručněji} \quad \begin{matrix} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{matrix}.$$

$$J(G(r, \varphi)) = \begin{vmatrix} \cos \varphi & -r \sin \varphi \\ \sin \varphi & r \cos \varphi \end{vmatrix} = r \cos^2 \varphi + r \sin^2 \varphi = r \neq 0 \quad \text{pro } r \neq 0.$$

16.4.4 Transformace integrálu v \mathbb{R}^3 do cylindrických (válcových) souřadnic

Zobrazení $G : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ je dáno předpisem

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = G(r, \varphi, z) = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \\ z \end{pmatrix}, \quad \text{stručněji} \quad \begin{matrix} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \\ z = z \end{matrix}.$$

$$J(G(r, \varphi, z)) = \begin{vmatrix} \cos \varphi & -r \sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & r \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = r \neq 0 \quad \text{pro } r \neq 0.$$

16.4.5 Transformace integrálu v \mathbb{R}^3 do sférických (kulových) souřadnic

Zobrazení $G : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ je dáno předpisem

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = G(r, \varphi, \vartheta) = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \cos \vartheta \\ r \sin \varphi \cos \vartheta \\ r \sin \vartheta \end{pmatrix}, \quad \text{stručněji} \quad \begin{matrix} x = r \cos \varphi \cos \vartheta \\ y = r \sin \varphi \cos \vartheta \\ z = r \sin \vartheta \end{matrix}.$$

$$\begin{aligned} J(G(r, \varphi, \vartheta)) &= \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \vartheta & -r \sin \varphi \cos \vartheta & -r \cos \varphi \sin \vartheta \\ \sin \varphi \cos \vartheta & r \cos \varphi \cos \vartheta & -r \sin \varphi \sin \vartheta \\ \sin \vartheta & 0 & r \cos \vartheta \end{vmatrix} = \\ &= \sin \vartheta \begin{vmatrix} -r \sin \varphi \cos \vartheta & -r \cos \varphi \sin \vartheta \\ r \cos \varphi \cos \vartheta & -r \sin \varphi \sin \vartheta \end{vmatrix} + r \cos \vartheta \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \vartheta & -r \sin \varphi \cos \vartheta \\ \sin \varphi \cos \vartheta & r \cos \varphi \cos \vartheta \end{vmatrix} = \\ &= r^2 \sin^2 \vartheta \cos \vartheta (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) + r^2 \cos^3 \vartheta (\cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta) = r^2 \cos \vartheta (\sin^2 \vartheta + \cos^2 \vartheta) = r^2 \cos \vartheta \neq 0 \end{aligned}$$

pro $r \neq 0$ a $\vartheta \neq (2m+1)\frac{\pi}{2}$, $m \in \mathbb{Z}$.

16.5 Aplikace Riemannova integrálu

16.5.1 Míra množiny — plocha obrazce, objem tělesa

$$m(A) = \int_A dx$$

16.5.2 Aplikace v mechanice

Buď $A \subseteq \mathbb{R}^k$ kompaktní měřitelná množina, $\rho : A \rightarrow \mathbb{R}$ spojitá funkce. Fyzikálně lze A chápat jako těleso mající v bodě \mathbf{x} hustotu $\rho(\mathbf{x})$. V mechanice mají základní význam pojmy:

- Hmotnost m tělesa A

$$m = \int_A \rho(\mathbf{x}) dx.$$

V rovině:

- statické momenty M_x, M_y rovinného tělesa vzhledem k osám x a y

$$M_x = \iint_A y\rho(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad \text{a} \quad M_y = \iint_A x\rho(\mathbf{x})d\mathbf{x},$$

- momenty setrvačnosti J_x, J_y rovinného tělesa vzhledem k osám x a y

$$J_x = \iint_A y^2\rho(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad \text{a} \quad J_y = \iint_A x^2\rho(\mathbf{x})d\mathbf{x},$$

- těžiště $T = (x_0, y_0)$ rovinného tělesa

$$x_0 = \frac{M_y}{m}, \quad y_0 = \frac{M_x}{m}.$$

V prostoru

- statické momenty tělesa vzhledem k souřadným osám

$$M_{yz} = \iiint_A x\rho(x, y, z)dxdydz, \quad M_{zx} = \iiint_A y\rho(x, y, z)dxdydz, \quad M_{xy} = \iiint_A z\rho(x, y, z)dxdydz,$$

- momenty setrvačnosti tělesa vzhledem k souřadným osám

$$J_x = \iiint_A (y^2 + z^2)\rho(x, y, z)dxdydz, \quad J_y = \iiint_A (x^2 + z^2)\rho(x, y, z)dxdydz,$$

$$J_z = \iiint_A (x^2 + y^2)\rho(x, y, z)dxdydz,$$

- těžiště $T = (x_0, y_0, z_0)$ tělesa

$$x_0 = \frac{M_{yz}}{m}, \quad y_0 = \frac{M_{zx}}{m}, \quad z_0 = \frac{M_{xy}}{m}.$$

16.6 Cvičení

- 1) Zaměňte pořadí integrace: $\int_0^1 \left(\int_{-\sqrt{1-y^2}}^{1-y} f(x, y)dx \right) dy$.
- 2) Dvojný integrál $\iint_{x^2+y^2 \leq x} f\left(\frac{y}{x}\right) dx dy$ vyjádřete pomocí integrálu jednoduchého.
- 3) Vypočítejte $\iint_A f(x, y)dxdy$, jestliže $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq A, b \leq y \leq B\}$, $f(x, y) = F_{xy}(x, y)$.
- 4) $\iint_A \frac{dxdy}{\sqrt{4-x}}$, $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : (x-2)^2 + (y-2)^2 \leq 4\}$.
- 5) $\iint_A (x^2 + y^2)dxdy$, A je vnitřek kružnice $x^2 + y^2 = 2ax$.
- 6) $\int_0^a \left(\int_0^{\sqrt{a^2-x^2}} \sqrt{x^2 + y^2} dy \right) dx$, $a > 0$.
- 7) $\iint_{x^2 \leq y \leq 4} \sqrt{[y-x^2]}dxdy$; $[a]$ je celá část čísla a .
- 8) Vypočítejte míru množiny $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 < 1, x + y < 1\}$.

9) Vypočítejte souřadnice těžiště homogenního rovinného tělesa ohraničeného čarami

$$y^2 = 4x + 4, \quad y^2 = -2x + 4.$$

10) Určete moment setrvačnosti vzhledem k ose x homogenního rovinného tělesa ohraničeného čarami

$$x + y = 2, \quad x = 2, \quad y = 2.$$

11) Zaměňte pořadí integrace: $\int_{-1}^1 \left(\int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} \left(\int_{\sqrt{x^2+y^2}}^1 f(x, y, z) dz \right) dy \right) dx$.

12) Trojnásobný integrál $\int_0^1 \left(\int_0^{x+y} \left(\int_0^1 f(z) dz \right) dy \right) dx$ nahraďte integrálem jednoduchým.

13) $\iiint_A \frac{dx dy dz}{(1+x+y+z)^3}$, $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, x + y + z \leq 1\}$.

14) $\iiint_A \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) dx dy dz$, $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} < 1\}$.

15) $\iiint_A z dx dy dz$, $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : z \geq 0, z \leq v, z^2 \geq \frac{v^2}{R^2}(x^2 + y^2)\}$.

16) $\iiint_A z^2 dx dy dz$, $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2, x^2 + y^2 + z^2 \leq 2Rz\}$.

17) $\iiint_A (x + y + z)^2 dx dy dz$, $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 \leq 2az, x^2 + y^2 + z^2 \leq 3a^2\}$.

18) Vypočítejte objem tělesa $\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0, x + y + z \leq 1, x^2 + y^2 \leq \frac{1}{2}\}$.

19) Jak mnoho kapaliny zůstane v nádobě válcového tvaru výšky v , jejíž základna má poloměr r , nakloníme-li ji tak, že hladina kapaliny prochází středem základny?

20) Vypočítejte souřadnice těžiště části elipsoidu $x^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2 + \left(\frac{z}{3}\right)^3 \leq 1$ ležící v prvním oktantu.

Výsledky: 1) $\int_{-1}^0 \left(\int_0^{\sqrt{1-x^2}} f(x, y) dy \right) dx + \int_0^1 \left(\int_0^{1-x} f(x, y) dy \right) dx$ 2) $\frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \varphi f(\operatorname{tg} \varphi) d\varphi$

3) $F(A, B) + F(a, b) - F(a, B) - F(A, b)$ 4) $\frac{32}{3}$ 5) $\frac{3\pi a^4}{2}$ 6) $\frac{\pi a^3}{6}$ 7) $\frac{16}{3}(1 + \sqrt{3}) - 4\sqrt{2}$

8) $\frac{1}{4}(3\pi + 2)$ 9) $\left(\frac{2}{5}, 0\right)$ 10) 4

11) $\int_{-1}^1 \left(\int_{|x|}^1 \left(\int_{-\sqrt{z^2-x^2}}^{\sqrt{z^2-x^2}} f(x, y, z) dy \right) dz \right) dx = \int_0^1 \left(\int_{-z}^z \left(\int_{-\sqrt{z^2-y^2}}^{\sqrt{z^2-y^2}} f(x, y, z) dx \right) dy \right) dz$

12) $\int_0^1 \left(1 - \frac{z^2}{2}\right) f(z) dz + \frac{1}{2} \int_1^2 (2 - z)^2 f(z) dz$ 13) $\frac{1}{2} \left(\ln 2 - \frac{5}{8}\right)$ 14) $\frac{4}{5} \pi abc$ 15) $\frac{\pi}{4} R^2 v^2$ 16) $\frac{59}{480} \pi R^5$

17) $\frac{\pi a^5}{5} (18\sqrt{3} - \frac{97}{6})$ 18) $\frac{\pi}{8} - \frac{\sqrt{2}}{6}$ 19) $\frac{2}{3} r^2 v$ 20) $\left(\frac{3}{8}, \frac{3}{4}, \frac{9}{8}\right)$

16.7 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definici x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití

- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam

- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Část VI

Diferenciální rovnice

Kapitola 17

Obyčejné diferenciální rovnice

17.1 Základní pojmy

17.1.1 Definice

Buď $G \subseteq \mathbb{R}^2$ množina s neprázdným vnitřkem, $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. Rovnice

$$x' = f(t, x) \tag{17.1}$$

se nazývá *obyčejná diferenciální rovnice prvního řádu rozřešená vzhledem k derivaci*.

Řešením této rovnice se rozumí diferencovatelná funkce $x : J \rightarrow \mathbb{R}$, kde $J \subseteq \mathbb{R}$ je interval, která splňuje podmínky

$$(t, x(t)) \in G, \quad x'(t) = f(t, x(t)) \text{ pro každé } t \in J.$$

Graf řešení rovnice (17.1) se nazývá *integrální křivka*.

17.1.2 Příklad

$$G = \{(t, x) \in \mathbb{R}^2 : t > 0\}, \quad f(t, x) = \frac{x}{t}.$$

Funkce $x(t) = kt$, kde $k \in \mathbb{R}$ je řešením rovnice $x' = \frac{x}{t}$ na intervalu $J = (0, \infty)$.

Diferenciální rovnice může mít více řešení.

17.1.3 Definice

Nechť G, f mají stejný význam jako v 17.1.1 a nechtě $(t_0, x_0) \in G$ je libovolný bod. Úloha najít řešení rovnice (17.1), které splňuje podmínku

$$x(t_0) = x_0 \tag{17.2}$$

se nazývá *počáteční* nebo *Cauchyova úloha*, podmínka (17.2) se nazývá *počáteční* nebo *Cauchyova podmínka*.

Příklad: Nechtě $t_0 > 0$, $x_0 \in \mathbb{R}$. Funkce $x(t) = \frac{x_0}{t_0}t$ je řešením úlohy

$$x' = \frac{x}{t}, \quad x(t_0) = x_0$$

na intervalu $J = (0, \infty)$.

17.1.4 Definice

Nechť $x = x(t)$ je řešením úlohy (17.1) (17.2) na intervalu J a $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$ je řešením úlohy (17.1) (17.2) na intervalu \tilde{J} , $t_0 \in J \cap \tilde{J}$. Jestliže $\tilde{J} \subseteq J$ a pro každé $t \in \tilde{J}$ je $x(t) = \tilde{x}(t)$, řekneme, že řešení $x = x(t)$ je *prodloužením řešení* $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$ a že řešení $\tilde{x} = \tilde{x}(t)$ je *zúžením řešení* $x = x(t)$. Jestliže řešení $x = x(t)$ úlohy (17.1) (17.2) není zúžením žádného jiného řešení této úlohy, řekneme, že $x = x(t)$ je *úplným (neprodlužitelným) řešením* úlohy (17.1) (17.2).

V dalším budeme pod pojmem „řešení“ rozumět úplné řešení.

17.1.5 Příklad

$x(t) \equiv 0$, $x(t) = t^3$, $x(t) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x-a)^3, & x \geq a \end{cases}$, kde $a \geq 0$ je libovolné číslo, jsou tři různá úplná řešení úlohy

$$x' = 3\sqrt[3]{x^2}, \quad x(0) = 0.$$

17.1.6 Definice

Bud' g funkce dvou proměnných. Řekneme, že g je *obecným řešením rovnice* (17.1), jestliže ke každému $(t_0, x_0) \in G$ existuje $C_0 \in \mathbb{R}$ takové, že $x = x(t) = g(t, C_0)$ je řešením úlohy (17.1) (17.2).

Řešení úlohy (17.1) (17.2) se nazývá *partikulární řešení rovnice* (17.1).

Příklad: $x = Ct$ je obecným řešením rovnice z příkladu 17.1.2.

Rovnice z příkladu 17.1.5 nemá obecné řešení.

17.1.7 Geometrická interpretace

Rovnice (17.1) přiřazuje každému bodu z G právě jednu hodnotu $x' = f(t, x)$, tedy každému bodu $(t_0, x_0) \in G$ lze přiřadit směrový vektor tečny k integrální křivce v bodě (t_0, x_0) , tj. přímkou $x - x_0 = f(t_0, x_0)(t - t_0)$. Tento vektor má souřadnice $(1, f(t_0, x_0))$. To znamená, že rovnice (17.1) definuje na G vektorové pole. Toto pole se nazývá *směrové pole rovnice* (17.1).

Každá integrální křivka rovnice (17.1) je vektorovou čarou směrového pole (sr. 14.1.9). Směrové pole tedy poskytuje představu o průběhu řešení rovnice (17.1).

Vrstevnice funkce f , (tj. křivky zadané rovnicí $f(t, x) = c$) se nazývají *izokliny rovnice* (17.1). Jsou to křivky, na nichž mají vektory ze směrového pole stejný směr.

17.1.8 Definice

Bud' $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ množina s neprázdným vnitřkem, $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^n$. Rovnice

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}), \quad \text{kde } \mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n) \tag{17.3}$$

se nazývá *systém n obyčejných diferenciálních rovnic prvního řádu* nebo *n -vektorová obyčejná diferenciální rovnice prvního řádu*.

Počáteční podmínku k rovnici (17.3) lze zadat:

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0). \tag{17.4}$$

Pojmy řešení, obecné řešení, partikulární řešení, úplné řešení rovnice (17.3) jsou analogiemi těchto pojmů z jednorozměrného případu. Obecné řešení závisí na n parametrech.

17.1.9 Definice

Buď $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ množina s neprázdným vnitřkem, $f : G \rightarrow \mathbb{R}$. Rovnice

$$x^{(n)} = f(t, x, x', x'', \dots, x^{(n-1)}) \quad (17.5)$$

se nazývá *obyčejná diferenciální rovnice n -tého řádu rozřešená vzhledem k nejvyšší derivaci*.

Řešením této rovnice se rozumí n -krát diferencovatelná funkce $x : J \rightarrow \mathbb{R}$, kde $J \subseteq \mathbb{R}$ je interval, která splňuje podmínky

$$(t, x(t), x'(t), x''(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \in G, \quad x^{(n)}(t) = f(t, x(t), x'(t), x''(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \text{ pro každé } t \in J.$$

Počáteční (Cauchyovu) podmínku pro rovnici (17.5) zadáváme ve tvaru

$$x(t_0) = x_0, \quad x'(t_0) = x_0^1, \quad x''(t_0) = x_0^2, \dots, \quad x^{(n-1)}(t_0) = x_0^{n-1}, \quad (17.6)$$

kde $(t_0, x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^{n-1}) \in G$.

Úplné řešení, obecné řešení, partikulární řešení rovnice (17.5) definujeme analogicky jako u rovnic prvního řádu. Obecné řešení závisí na n parametrech.

17.1.10 Poznámka

Řešení počáteční úlohy (17.5), (17.6) je ekvivalentní s řešením počátečního problému pro systém n diferenciálních rovnic prvního řádu:

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= x_3 \\ &\vdots \\ x_{n-1}' &= x_n \\ x_n' &= f(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (17.7)$$

$$x_1(t_0) = x_0, \quad x_2(t_0) = x_0^2, \quad \dots, \quad x_n(t_0) = x_0^{n-1}, \quad (17.8)$$

v tomto smyslu: Je-li $x = x(t)$ řešením úlohy (17.5), (17.6), pak n -tice funkcí $x_1 = x, x_2 = x', x_3 = x'', \dots, x_n = x^{(n-1)}$ je řešením úlohy (17.7), (17.8) a je-li n -tice funkcí $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_n = x_n(t)$ řešením úlohy (17.7), (17.8), pak je funkce $x = x(t) = x_1(t)$ řešením úlohy (17.5), (17.6).

17.2 Elementární metody řešení ODR

17.2.1 Exaktní rovnice

$$\begin{aligned} x' &= \frac{f(t, x)}{g(t, x)}, \quad \text{přičemž} \quad \frac{\partial f(t, x)}{\partial x} = -\frac{\partial g(t, x)}{\partial t} \\ 0 &= f(t, x)dt - g(t, x)dx. \end{aligned}$$

Za uvedených podmínek je $f(t, x)dt - g(t, x)dx$ totálním diferenciálem nějaké funkce F dvou proměnných (sr. 12.3.9), přičemž platí $dF(t, x) = 0$. Obecné řešení dané rovnice je tedy implicitně zadáno rovnicí $F(t, x) = C$, kde C je reálná konstanta.

17.2.2 Rovnice se separovanými proměnnými $x' = f(t)g(x)$

Rovností $g(x) = 0$ je implicitně zadáno *singulární* (konstantní) řešení.

Rovností

$$\int \frac{dx}{g(x)} = \int f(t)dt$$

je implicitně zadáno obecné řešení dané rovnice.

Rovností

$$\int_{x_0}^x \frac{d\xi}{g(\xi)} = \int_{t_0}^t f(\tau)d\tau$$

je implicitně zadáno partikulární řešení této rovnice, které splňuje počáteční podmínku (17.2).

17.2.3 Homogenní rovnice $x' = f\left(\frac{x}{t}\right)$

Zavedeme funkci $u = u(t) = \frac{x(t)}{t}$. Pak $x(t) = tu(t)$, $x' = u + tu'$. Dosazením do původní rovnice dostaneme

$$u' = \frac{f(u) - u}{t},$$

což je rovnice se separovanými proměnnými pro neznámou funkci u .

17.2.4 Rovnice typu $x' = f\left(\frac{at + bx + c}{\alpha t + \beta x + \gamma}\right)$

1. $c = \gamma = 0$. Pak $f\left(\frac{at + bx}{\alpha t + \beta x}\right) = f\left(\frac{a + b\frac{x}{t}}{\alpha + \beta\frac{x}{t}}\right)$ a daná rovnice je homogenní.

2. $c^2 + \gamma^2 \neq 0$, $\frac{\alpha}{a} = \frac{\beta}{b} = k$.

Zavedeme funkci $u = u(t) = at + bx$. Pak $u' = a + bx'$ a tedy $x' = \frac{u' - a}{b}$. Dosazením do původní rovnice dostaneme

$$u' = a + bf\left(\frac{u + c}{ku + \gamma}\right),$$

což je rovnice se separovanými proměnnými pro neznámou funkci u .

3. $c^2 + \gamma^2 \neq 0$, $a\beta \neq b\alpha$.

Nechť m a n jsou řešením soustavy lineárních algebraických rovnic

$$\begin{aligned} am + bn &= -c \\ \alpha m + \beta n &= -\gamma. \end{aligned}$$

Zavedeme funkce $u = u(t) = t - m$
 $v = v(t) = x - n$.

Pak $dt = du$, $dx = dv$,

$$at + bx + c = a(u + m) + b(v + n) + c = au + bv + (am + bn) + c = au + bv,$$

$$\alpha t + \beta x + \gamma = \alpha(u + m) + \beta(v + n) + \gamma = \alpha u + \beta v + (\alpha m + \beta n) + \gamma = \alpha u + \beta v$$

Daná rovnice přejde na tvar

$$\frac{dv}{du} = f\left(\frac{au + bv}{\alpha u + \beta v}\right),$$

což je rovnice typu 1. pro neznámou funkci $v = v(u)$.

17.2.5 Lineární rovnice $x' = a(t)x + b(t)$

1. $b(t) \equiv 0$ (homogenní rovnice)

Je to rovnice se separovanými proměnnými. Partikulární řešení počátečního problému (s podmínkou (17.2)) je:

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^x \frac{d\xi}{\xi} &= \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \\ \ln x - \ln x_0 &= \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \\ x &= x_0 \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \end{aligned}$$

Obecné řešení homogenní lineární rovnice lze tedy zapsat

$$x = C \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau.$$

2. $b(t) \neq 0$ (nehomogenní rovnice)

Řešení hledáme ve tvaru

$$x(t) = C(t) \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau$$

(metoda variace konstanty). Pak $x' = (C'(t) + a(t)C(t)) \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau$. Dosazením do dané rovnice dostaneme

$$\begin{aligned} (C'(t) + a(t)C(t)) \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau &= a(t)C(t) \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau + b(t) \\ C'(t) &= b(t) \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \\ C(t) - C(t_0) &= \int_{t_0}^t \left(b(\sigma) \exp \int_{\sigma}^{t_0} a(\tau) d\tau \right) d\sigma \end{aligned}$$

Obecné řešení nehomogenní rovnice tedy je

$$x(t) = \left[\text{const} + \int_{t_0}^t \left(b(\sigma) \exp \int_{\sigma}^{t_0} a(\tau) d\tau \right) d\sigma \right] \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau.$$

Partikulární řešení splňující počáteční podmínku (17.2) je

$$x(t) = \left[x_0 + \int_{t_0}^t \left(b(\sigma) \exp \int_{\sigma}^{t_0} a(\tau) d\tau \right) d\sigma \right] \exp \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau.$$

Jsou-li koeficienty konstantní, $a(t) \equiv A$, $b(t) \equiv B$, pak

$$x(t) = \left(x_0 + \frac{B}{A} \right) e^{A(t-t_0)} - \frac{B}{A}.$$

Jiný postup při řešení nehomogenní rovnice:

$$\begin{aligned} x' - a(t)x &= b(t) && / e^{-\int a(t) dt} \\ x' e^{-\int a(t) dt} - a(t)x e^{-\int a(t) dt} &= b(t) e^{-\int a(t) dt} \\ \frac{d}{dt} \left(x e^{-\int a(t) dt} \right) &= b(t) e^{-\int a(t) dt} \\ x e^{-\int a(t) dt} &= \int b(t) e^{-\int a(t) dt} dt \\ x &= e^{\int a(t) dt} \int b(t) e^{-\int a(t) dt} dt \end{aligned}$$

17.2.6 Bernoulliho rovnice $x' = a(t)x + b(t)x^r$, $r \in \mathbb{R}$

Zavedeme funkci $u = u(t) = x(t)^{1-r}$. Pak $x = u^{\frac{1}{1-r}}$, $x' = \frac{1}{1-r}u^{\frac{1}{1-r}-1}u'$. Dosadíme do dané rovnice:

$$\begin{aligned}\frac{1}{1-r}u^{\frac{r}{1-r}}u' &= a(t)u^{\frac{1}{1-r}} + b(t)u^{\frac{r}{1-r}} / (1-r)u^{\frac{r}{1-r}} \\ u' &= (1-r)a(t)u + (1-r)b(t),\end{aligned}$$

Což je lineární rovnice pro neznámou funkci u .

Jsou-li koeficienty konstantní, $a(t) \equiv A$, $b(t) \equiv B$, lze použít substituci

$$x = \left(y - \frac{B}{A}\right)^{-\frac{1}{r-1}}.$$

pak

$$x' = -\frac{1}{r-1} \left(y - \frac{B}{A}\right)^{-\frac{1}{r-1}-1} y'$$

a tedy

$$\begin{aligned}-\frac{1}{r-1} \left(y - \frac{B}{A}\right)^{-\frac{1}{r-1}-1} y' &= \left(A + B \left(y - \frac{B}{A}\right)^{-1}\right) \left(y - \frac{B}{A}\right)^{-\frac{1}{r-1}} \\ -\frac{1}{r-1} y' &= \left(A + B \frac{A}{Ay - B}\right) \frac{Ay - B}{A} \\ \frac{1}{1-r} y' &= \frac{A^2 y - AB + AB}{Ay - B} \frac{Ay - B}{A} \\ y' &= (1-r)Ay,\end{aligned}$$

což je lineární homogenní rovnice.

17.2.7 Rovnice nerozřešená vzhledem k derivaci $F(t, x, x') = 0$

Zavedeme funkci $p = p(t) = x'(t)$.

1. Rovnice autonomní $F(x, x') = 0$

Rovnicí $F(x, p) = 0$ může být implicitně zadána funkce $p = p(x)$. Rovnici $F(x, p(x)) = 0$ derivujeme podle proměnné x :

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial x}(x, p) + \frac{\partial F}{\partial p}(x, p) \frac{dp}{dx} &= 0 \\ \frac{dp}{dx} &= -\frac{\frac{\partial F}{\partial x}(x, p)}{\frac{\partial F}{\partial p}(x, p)},\end{aligned}$$

což je rovnice pro neznámou funkci p nezávisle proměnné x rozřešená vzhledem k derivaci. Je-li $p = p(x)$ řešením poslední rovnice, pak rovnice se separovanými proměnnými $x' = p(x)$ je řešením původní rovnice; její obecné řešení je tedy implicitně zadáno rovnicí

$$\int \frac{dx}{p(x)} = t + const.$$

2. Rovnice nezávislejší na neznámé funkci $F(t, x') = 0$.

Rovnici $F(t, p) = 0$ derivujeme podle proměnné t :

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial t}(t, p) + \frac{\partial F}{\partial p}(t, p) \frac{dp}{dt} &= 0 \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{\frac{\partial F}{\partial t}(t, p)}{\frac{\partial F}{\partial p}(t, p)},\end{aligned}$$

což je rovnice pro neznámou funkci $p = p(t)$ rozřešená vzhledem k derivaci. Je-li $p = p(t)$ řešením poslední rovnice, je funkce $x = x(t) = \int p(t)dt$ obecným řešením dané rovnice.

3. Clairautova rovnice $x = tx' + g(x')$.

Rovnici $x = tp + g(p)$ derivujeme podle proměnné t :

$$\begin{aligned} p &= p + t \frac{dp}{dt} + g'(p) \frac{dp}{dt} \\ 0 &= (t + g'(p)) \frac{dp}{dt} \end{aligned}$$

Musí tedy být $\frac{dp}{dt} = 0$ nebo $t = -g'(p)$.

Z první rovnosti a dané rovnice dostaneme obecné řešení

$$x(t) = ct + g(c),$$

kde $c \in \mathbb{R}$ je libovolná konstanta; z druhé rovnice dostaneme parametrické vyjádření singulárního řešení

$$\begin{aligned} t &= -g'(p) \\ x &= -pg'(p) + g(p), \end{aligned}$$

kde p je parametr.

4. Lagrangeova rovnice $x = tf(x') + g(x')$.

Rovnici $x = tf(p) + g(p)$ derivujeme podle proměnné t :

$$\begin{aligned} p &= f(p) + tf'(p) \frac{dp}{dt} + g'(p) \frac{dp}{dt} \\ p - f(p) &= (tf'(p) + g'(p)) \frac{dp}{dt} \end{aligned}$$

Má-li rovnice $p - f(p) = 0$ řešení $p \equiv c$, pak $x(t) = ct + c_1$ je singulárním řešením dané rovnice. Konstantu c_1 určíme dosazením do dané rovnice:

$$\begin{aligned} ct + c_1 &= tf(c) + g(c) \\ c_1 &= t(f(c) - c) + g(c) \end{aligned}$$

a poněvadž $f(c) = c$, je $c_1 = g(c)$. Singulární řešení Lagrangeovy rovnice tedy je

$$x(t) = ct + g(c),$$

kde c je řešením rovnice $c = f(c)$ (je pevným bodem funkce f).

Pro $p \neq f(p)$ dostaneme

$$\frac{dt}{dp} = \frac{tf'(p) + g'(p)}{p - f(p)},$$

což je lineární rovnice pro neznámou funkci t nezávisle proměnné p . Označíme-li její řešení $t = t(p) = \Phi(p)$, pak

$$\begin{aligned} t &= \Phi(p) \\ x &= f(p)\Phi(p) + g(p) \end{aligned}$$

je parametrickým vyjádřením obecného řešení Lagrangeovy rovnice.

17.2.8 Rovnice typu $x'' = f(x)$

Rovnici vynásobíme $2x'$:

$$\begin{aligned} 2x'x'' &= 2x'f(x) \\ \frac{d}{dt}(x'^2) &= 2\frac{dx}{dt}f(x) \end{aligned}$$

Položíme-li $p = x'$, máme

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}p^2 &= 2\frac{dx}{dt}f(x) \\ \frac{dp^2}{dx}\frac{dx}{dt} &= 2f(x)\frac{dx}{dt} \\ \frac{dp^2}{dx} &= 2f(x) \\ p^2 &= 2\int f(x)dx.\end{aligned}$$

Položíme dále $F(x) = 2\int f(x)dx$ a dostaneme

$$\begin{aligned}p &= \pm\sqrt{F(x)} \\ \frac{dx}{dt} &= \pm\sqrt{F(x)},\end{aligned}$$

což je rovnice prvního řádu se separovanými proměnnými.

17.2.9 Rovnice typu $F(t, x^{(k)}, x^{(k+1)}, \dots, x^{(n)}) = 0$, $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$

Položíme $y = y(t) = x^{(k)}(t)$ a dostaneme rovnici

$$F(t, y, y', y'', \dots, y^{(n-k)}) = 0,$$

což je rovnice řádu o k nižšího, než daná rovnice.

17.2.10 Autonomní rovnice typu $F(x, x', x'', \dots, x^{(n)}) = 0$

Položíme $p = p(t) = x'(t)$. Pak

$$\begin{aligned}x'' &= \frac{dp}{dt} = \frac{dp}{dx}\frac{dx}{dt} = p\frac{dp}{dx} \\ x''' &= \frac{d}{dt}\left(p\frac{dp}{dx}\right) = \frac{d}{dx}\left(p\frac{dp}{dx}\right)\frac{dx}{dt} = \left(\left(\frac{dp}{dx}\right)^2 + p\frac{d^2p}{dx^2}\right)p.\end{aligned}$$

Postupujeme-li tak dále, vidíme, že

$$x^{(k)} = f_k\left(p, \frac{dp}{dx}, \dots, \frac{d^{k-1}p}{dx^{k-1}}\right)$$

pro každé $k \in \mathbb{N}$. (f_k je nějaká funkce k proměnných.) Dosazením do původní rovnice tedy dostaneme

$$F\left(x, p, p\frac{dp}{dx}, f_3\left(p, \frac{dp}{dx}, \frac{d^2p}{dx^2}\right), \dots, f_n\left(p, \frac{dp}{dx}, \dots, \frac{d^{n-1}p}{dx^{n-1}}\right)\right) = 0,$$

neboli

$$G\left(x, p, \frac{dp}{dx}, \dots, \frac{d^{n-1}p}{dx^{n-1}}\right) = 0,$$

což je rovnice řádu o jedna nižšího, než daná rovnice.

17.2.11 Rovnice homogenní v $x, x', x'', \dots, x^{(n)}$

Nechť F je funkce $n+1$ proměnných splňující podmínku

$$F(z_0, cz_1, cz_2, \dots, cz_n) = cF(z_0, z_1, z_2, \dots, z_n) \quad (17.9)$$

pro každé $c \in \mathbb{R}$ a každé $(z_0, z_1, z_2, \dots, z_n) \in \text{Dom } F$.

Řešení rovnice

$$F(t, x, x', x'' \dots, x^{(n)}) = 0$$

lze hledat ve tvaru $x(t) = e^{\int y(t)dt}$, kde $y = y(t)$ je nová neznámá funkce. Je totiž

$$\begin{aligned} x' &= ye^{\int y(t)dt} \\ x'' &= y'e^{\int y(t)dt} + y^2e^{\int y(t)dt} = (y' + y^2)e^{\int y(t)dt} \\ x''' &= (y'' + 2yy')e^{\int y(t)dt} + (y' + y^2)y e^{\int y(t)dt} = (y'' + 3yy' + y^3)e^{\int y(t)dt} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Dosadíme-li z těchto rovnic do dané rovnice, vypadne vzhledem k podmínce (17.9) faktor $e^{\int y(t)dt}$ a dostaneme rovnici řádu o 1 nižšího, než byla daná rovnice.

17.2.12 Ekvidimensionální rovnice

Řekneme, že rovnice

$$F(t, x, x', \dots, x^{(n)}) = 0$$

je *ekvidimensionální v nezávisle proměnné*, jestliže změna měřítka nezávisle proměnné $t \mapsto at$ pro každé $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ nezmění její tvar. Transformace $t = e^{\tau}$ převede danou rovnici na rovnici autonomní (typ 17.2.10).

17.3 Existence a jednoznačnost řešení systému ODR

Budeme se zabývat úlohou (17.3), (17.4). Pro vektor $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ definujeme *normu* $|\mathbf{x}| = \sum_{i=1}^n |x_i|$.

Poznamenejme, že funkce ρ definovaná na $(\mathbb{R}^n)^2$ předpisem $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ je metrikou na \mathbb{R}^n . (Je to taxikářská metrika, 11.1.2.3.)

17.3.1 Lemma

Bud' \mathbf{f} spojitá na $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$. Funkce $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ je řešením úlohy (17.3), (17.4) na intervalu J právě tehdy, když pro každé $t \in J$ je $(t, \mathbf{x}(t)) \in G$ a

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds. \quad (17.10)$$

D.: „ \Rightarrow “ Necht' $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ je řešením úlohy (17.3), (17.4) na J . Pak

$$\frac{d}{ds} \mathbf{x}(s) = \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s))$$

na J . Integrací této rovnosti podle s v mezích $[t_0, t]$ dostaneme:

$$\begin{aligned} [\mathbf{x}(s)]_{t_0}^t &= \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds \\ \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_0) &= \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds \end{aligned}$$

a vzhledem k (17.4) funkce $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ splňuje (17.10).

„⇐“ Necht funkce $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ splňuje (17.10). Pak $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^{t_0} \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds = \mathbf{x}^0$, tedy je splněna podmínka (17.4). Derivováním (17.10) podle t dostaneme (17.3). \square

Necht $C^1(J)$ je množina (vektorových) funkcí $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ diferencovatelných na uzavřeném intervalu J takových, že $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0$. Na této množině zavedeme metriku $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max\{|\mathbf{x}(t) - \mathbf{y}(t)| : t \in J\}$ (metrika stejnoměrné konvergence, sr. 11.1.2.4). Prostor $(C^1(J), \rho)$ je úplný (sr. 11.4.2.4). Dále definujeme zobrazení $F : C^1(J) \rightarrow C^1(J)$ předpisem:

$$F(\mathbf{x})(t) = \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds.$$

Řešení úlohy (17.3), (17.4), tedy funkce, která splňuje (17.10), je zřejmě pevným bodem zobrazení F . Podaří-li se tedy ukázat, že F je kontrakce úplného metrického prostoru $(C^1(J), \rho)$ (sr. 11.5.9), z Banachovy věty 11.5.14 vyplyne, že existuje jediný pevný bod tohoto zobrazení, tedy že existuje jediné diferencovatelné řešení úlohy (17.3), (17.4).

17.3.2 Věta (Picard [1856 – 1941] – Lindelöf [1870 – 1946])

Budte $a, b \in \mathbb{R}$, $a, b > 0$, $t_0 \in \mathbb{R}$, $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^n$. Označme $\tilde{J} = [t_0, t_0 + a]$, $D = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : |\mathbf{x} - \mathbf{x}^0| \leq b\}$, $m = \max\{|\mathbf{f}(t, \mathbf{x})| : (t, \mathbf{x}) \in \tilde{J} \times D\}$, $\delta = \min\left\{a, \frac{b}{m}\right\}$. Necht funkce $\mathbf{f} : \tilde{J} \times D \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá a vzhledem k \mathbf{x} Lipschitzovská (tj. existuje $L \in \mathbb{R}$ tak, že platí $|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) - \mathbf{f}(t, \mathbf{y})| \leq L|\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ pro všechna $t \in \tilde{J}$, $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in D$). Pak existuje právě jedno řešení počátečního problému (17.3), (17.4) definované na intervalu $J = [t_0, t_0 + \delta]$. Toto řešení je (stejněměrnou) limitou posloupnosti funkcí $\{\mathbf{x}_n(t)\}_{n=1}^{\infty}$, kde

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{x}^0 \\ \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}_k(s)) ds, \quad k = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

D.: Funkce $\mathbf{y}(t) = F(\mathbf{x})(t)$ je podle 5.3.3 diferencovatelná, $\mathbf{y}'(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t))$. To znamená, že zobrazení F definované před větou zobrazuje $C^1(J)$ do sebe. Buď $K > L$. Na $C^1(J)$ zavedeme metriku ρ^* vztahem

$$\rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max\left\{e^{-K(t-t_0)}|\mathbf{x}(t) - \mathbf{y}(t)| : t \in J\right\}.$$

Tato metrika je na $C^1(J)$ ekvivalentní s metrikou stejnoměrné konvergence ρ , neboť

$$e^{-K\delta} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}).$$

Prostor $(C^1(J), \rho^*)$ je tedy úplný.

Položme $P = \{\mathbf{x} \in C^1(J) : |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^0| \leq b \text{ pro každé } t \in J\}$. Podle 11.4.3 je (\overline{P}, ρ^*) úplný prostor. Zobrazení F zobrazuje množinu \overline{P} do sebe, neboť pro každou funkci $\mathbf{x} \in P$ platí

$$|F(\mathbf{x})(t) - \mathbf{x}^0| = \left| \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds \right| \leq \int_{t_0}^t |\mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s))| ds \leq (t - t_0)m \leq \delta m \leq b.$$

Ukážeme, že F je kontrakcí prostoru (\bar{P}, ρ^*) :

$$\begin{aligned}
 \rho^*(F(\mathbf{x}), F(\mathbf{y})) &\leq e^{-K(t-t_0)} |F(\mathbf{x})(t) - F(\mathbf{y})(t)| = e^{-K(t-t_0)} \left| \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds - \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{y}(s)) ds \right| \leq \\
 &\leq e^{-K(t-t_0)} \int_{t_0}^t |\mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) - \mathbf{f}(s, \mathbf{y}(s))| ds \leq \\
 &\leq e^{-K(t-t_0)} \int_{t_0}^t L |\mathbf{x}(s) - \mathbf{y}(s)| ds = \\
 &= L \int_{t_0}^t e^{-K(t-s)} e^{-K(s-t_0)} |\mathbf{x}(s) - \mathbf{y}(s)| ds \leq \\
 &\leq L \int_{t_0}^t e^{-K(t-s)} \rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) ds = \\
 &= L \rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \left[\frac{1}{K} e^{-K(t-s)} \right]_{s=t_0}^t = \\
 &= \frac{L}{K} \rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}) (1 - e^{-K(t-t_0)}) \leq \\
 &\leq \frac{L}{K} \rho^*(\mathbf{x}, \mathbf{y}).
 \end{aligned}$$

Poněvadž $L < K$, je $\frac{L}{K} < 1$, což znamená, že F je kontrakce. \square

17.3.3 Poznámky

1. Posloupnost funkcí zavedená v 17.3.2 se nazývá *Picardova posloupnost postupných aproximací*.
2. Analogické tvrzení platí, nahradíme-li v 17.3.2 interval $\tilde{J} = [t_0, t_0 + a]$ intervalem $[t_0 - a, t_0]$ nebo intervalem $[t_0 - a, t_0 + a]$.

3. Má-li funkce $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) = \begin{pmatrix} f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix}$ ohraničené parciální derivace všech složek podle každé z proměnných x_1, x_2, \dots, x_n na množině $\tilde{J} \times D$ (zavedené v 17.3.2), pak jsou předpoklady Picardovy – Lindelöfovy věty splněny.

D.: Množina $\tilde{J} \times D$ je podle 11.4.8 kompaktní. Z ohraničenosti parciálních derivací funkce \mathbf{f} plyne existence čísla

$$M = \max \left\{ \frac{\partial f_i(t, \mathbf{x})}{\partial x_j} : i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, (t, \mathbf{x}) \in \tilde{J} \times D \right\}.$$

Podle 12.2.4 je pro všechna $t \in \tilde{J}$ a $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in D$:

$$\begin{aligned} |\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) - \mathbf{f}(t, \mathbf{y})| &= \sum_{i=1}^n |f_i(t, \mathbf{x}) - f_i(t, \mathbf{y})| = \\ &= \sum_{i=1}^n \left| \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_k}(t, x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, \xi_k, y_{k+1}, \dots, y_n)(x_k - y_k) \right| \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \left| \frac{\partial f_i}{\partial x_k}(t, x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, \xi_k, y_{k+1}, \dots, y_n) \right| |x_k - y_k| \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n M |x_k - y_k| = \sum_{i=1}^n M |\mathbf{x} - \mathbf{y}| = nM |\mathbf{x} - \mathbf{y}|, \end{aligned}$$

takže funkce \mathbf{f} je vzhledem k \mathbf{x} Lipschitzovská s konstantou nM . \square

17.3.4 Důsledky

1. Má-li (vektorová) funkce $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) = \begin{pmatrix} f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix}$ ohraničené parciální derivace všech složek

podle každé z proměnných x_1, x_2, \dots, x_n v jistém okolí bodu (t_0, \mathbf{x}^0) , pak počáteční problém (17.3), (17.4) má v okolí t_0 jediné řešení.

2. Má-li (skalární) funkce $f(t, x_1, x_2, \dots, x_n)$ v jistém okolí bodu $(t_0, x_0, x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^n)$ ohraničené parciální derivace podle každé z proměnných x_1, x_2, \dots, x_n , pak počáteční problém (17.5), (17.6) má v okolí t_0 jediné řešení.

17.3.5 Věta (Peano [1890])

Buďte $a, b \in \mathbb{R}$, $a, b > 0$, $t_0 \in \mathbb{R}$, $\mathbf{x}^0 \in \mathbb{R}^n$. Označme $\tilde{J} = [t_0, t_0 + a]$, $D = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : |\mathbf{x} - \mathbf{x}^0| \leq b\}$, $m = \max\{|\mathbf{f}(t, \mathbf{x})| : (t, \mathbf{x}) \in \tilde{J} \times D\}$, $\delta = \min\left\{a, \frac{b}{m}\right\}$. Nechť funkce $\mathbf{f} : \tilde{J} \times D \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá. Pak existuje alespoň jedno řešení počátečního problému (17.3), (17.4) definované na intervalu $J = [t_0, t_0 + \delta]$.

D.: Viz Kalas, Ráb: Obyčejné diferenciální rovnice, str. 67–70. \square

17.4 Globální vlastnosti řešení systému ODR

17.4.1 Věta (o existenci úplného řešení)

Nechť funkce $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá na otevřené množině $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$. Je-li $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ řešení rovnice (17.3), pak je toto řešení buď úplné, nebo existuje úplné řešení $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$, které je prodloužením řešení \mathbf{x} .

D.: Viz Kalas, Ráb: Obyčejné diferenciální rovnice, str. 73–76. \square

17.4.2 Definice

Buď $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$. Řekneme, že funkce $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ je *lokálně lipschitzovská v G vzhledem k \mathbf{x}* , jestliže ke každému $(\tau, \mathbf{a}) \in G$ existuje okolí $\mathcal{O}_{\tau, \mathbf{a}} \subseteq G$ a číslo $L_{\tau, \mathbf{a}} \in \mathbb{R}$ tak, že pro všechna $(t, \mathbf{x}), (t, \mathbf{y}) \in \mathcal{O}_{\tau, \mathbf{a}}$ platí $|\mathbf{f}(t, \mathbf{x}) - \mathbf{f}(t, \mathbf{y})| \leq L_{\tau, \mathbf{a}} |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$.

17.4.3 Věta (o globální jednoznačnosti)

Nechť funkce $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá a lokálně lipschitzovská v G vzhledem k \mathbf{x} a nechť $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ jsou dvě řešení (17.3). Jestliže existuje t_0 takové, že $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{y}(t_0)$, pak $\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t)$ pro všechna t , v nichž jsou řešení \mathbf{x} , \mathbf{y} definována.

D.: Pripusťme, že existuje $b > t_0$ takové, že $\mathbf{x}(b) \neq \mathbf{y}(b)$. Označme $c = \inf\{t : \mathbf{x}(t) \neq \mathbf{y}(t)\}$.

Funkce \mathbf{x} , \mathbf{y} jsou spojité (poněvadž jsou diferencovatelné).

Ukážeme, že $\mathbf{x}(c) = \mathbf{y}(c)$:

Pripusťme, že $\mathbf{x}(c) \neq \mathbf{y}(c)$. Položme $\varepsilon = |\mathbf{x}(c) - \mathbf{y}(c)|$.

K $\frac{\varepsilon}{4} > 0$ existuje $\delta > 0$ tak, že pro každé $t \in (c - \delta, c)$ je $|\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(c)| < \frac{\varepsilon}{4}$ a $|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(c)| < \frac{\varepsilon}{4}$.

Poněvadž pro $t \in (c - \delta, c)$ je $\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t)$, platí pro $t \in (c - \delta, c)$:

$$\varepsilon = |\mathbf{x}(c) - \mathbf{y}(c)| = |\mathbf{x}(c) - \mathbf{x}(t) + \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(c)| \leq |\mathbf{x}(c) - \mathbf{x}(t)| + |\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(c)| \leq \frac{\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{4} = \frac{\varepsilon}{2},$$

což je spor a tedy $\mathbf{x}(c) = \mathbf{y}(c)$.

Podle 17.3.2 existuje α takové, že pro $t \in [c, c + \alpha]$ je $\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t)$, což je spor. \square

17.4.4 Definice

Buď $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ úplné řešení rovnice (17.3) definované na intervalu (S, T) , kde $-\infty \leq S < T \leq \infty$.

Řekneme, že $\xi \in \mathbb{R}^n$ je ω -limitní bod řešení \mathbf{x} , jestliže existuje posloupnost $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$ taková, že $t_k < T$ pro všechna $k \in \mathbb{N}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = T$ a $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t_k) = \xi$.

Řekneme, že $\xi \in \mathbb{R}^n$ je α -limitní bod řešení \mathbf{x} , jestliže existuje posloupnost $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$ taková, že $t_k > S$ pro všechna $k \in \mathbb{N}$, $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = S$ a $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t_k) = \xi$.

Řekneme, že $\xi \in \mathbb{R}^n$ je limitní bod řešení \mathbf{x} , jestliže je ω -limitním bodem nebo α -limitním bodem.

Množina všech ω -limitních bodů řešení \mathbf{x} se nazývá ω -limitní množina řešení \mathbf{x} , množina všech α -limitních bodů řešení \mathbf{x} se nazývá α -limitní množina řešení \mathbf{x} , množina všech limitních bodů řešení \mathbf{x} se nazývá limitní množina řešení \mathbf{x} .

17.4.5 Příklady

1. $x = e^{at}$ je úplné řešení rovnice $x' = ax$ definované na intervalu $(-\infty, \infty)$. Je-li $a > 0$, je 0 α -limitním bodem tohoto řešení a ω -limitní body toto řešení nemá. Je-li $a < 0$, je 0 ω -limitním bodem tohoto řešení a α -limitní body toto řešení nemá. Je-li $a = 0$, je 1 α - i ω -limitním bodem tohoto řešení.

2. $x = \sin \frac{1}{t}$ je úplné řešení rovnice $x' = -\frac{\cos \frac{1}{t}}{t^2}$ definované na intervalu $(-\infty, 0)$. Interval $[-1, 1]$ je ω -limitní množinou tohoto řešení.

3.
$$\begin{aligned} x &= \cos \operatorname{tg} t \\ y &= \sin \operatorname{tg} t \end{aligned}$$
 je úplné řešení soustavy rovnic
$$\begin{aligned} x' &= -\frac{y}{\cos^2 t} \\ y' &= \frac{x}{\cos^2 t} \end{aligned}$$
 definované na intervalu $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$.

Limitní množina tohoto řešení je $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 = 1\}$.

17.4.6 Věta

Nechť funkce $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá na otevřené množině $G \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ a $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ je úplné řešení rovnice (17.3) definované na intervalu (S, T) . Pak platí:

$T = \infty$ nebo každý ω -limitní bod řešení \mathbf{x} leží na hranici G .

$S = -\infty$ nebo každý α -limitní bod řešení \mathbf{x} leží na hranici G .

D.: Buď $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ úplné řešení rovnice (17.3) definované na intervalu (S, T) , $T < \infty$ a buď ξ jeho ω -limitní bod. Kdyby $(T, \xi) \in G$, pak by existovalo okolí $\mathcal{O}_{T, \xi}$ bodu (T, ξ) takové, že $\mathcal{O}_{T, \xi} \subseteq G$, neboť G je otevřená.

Podle 17.3.5 by existovalo řešení $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ rovnice (17.3) s počáteční podmínkou $\mathbf{y}(T) = \xi$ definované na $[T, T + \delta]$, kde δ je vhodné (malé) číslo. Funkce

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}(t) = \begin{cases} \mathbf{x}(t), & S < t < T \\ \mathbf{y}(t), & T + \delta \end{cases}$$

by byla řešením rovnice (17.3), které by bylo prodloužením řešení \mathbf{x} , což by byl spor s úplností řešení \mathbf{x} . Pro α -limitní bod se důkaz provede analogicky s využitím „levostranné varianty“ věty 17.3.5. \square

17.4.7 Důsledek

Nechť $J = [t_0, \infty)$, $D = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : |\mathbf{x}| < a\}$, kde $t_0 \in \mathbb{R}$ a $0 < a \leq \infty$ a nechť funkce $\mathbf{f} : J \times D \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá. Jestliže existuje spojitá funkce $g : J \rightarrow \mathbb{R}$ taková, že úplné řešení $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ rovnice (17.3) definované na (S, T) splňuje pro každé $t \in [t_0, T)$ podmínku $|\mathbf{x}(t)| \leq g(t) < a$, pak $T = \infty$.

17.4.8 Důsledek

Nechť $J = [t_0, \infty)$ a funkce $\mathbf{f} : J \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je spojitá. Jestliže existuje $m \in \mathbb{R}$ takové, že pro každé $(t, \mathbf{x}) \in J \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ platí $|\mathbf{f}(t, \mathbf{x})| \leq m$, pak každé úplné řešení rovnice (17.3) je definováno pro všechna $t \geq t_0$.

D.: Buď $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ úplné řešení rovnice (17.3). Podle 17.3.1 je

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds.$$

Pro každé t , pro něž je $\mathbf{x}(t)$ definováno, platí

$$\begin{aligned} |\mathbf{x}(t)| &= \left| \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s)) ds \right| \leq |\mathbf{x}(t_0)| + \int_{t_0}^t |\mathbf{f}(s, \mathbf{x}(s))| ds \leq \\ &\leq |\mathbf{x}(t_0)| + m(t - t_0). \end{aligned}$$

Tvrzení tedy plyne z 17.4.7, položíme-li $g(t) = |\mathbf{x}(t_0)| + m(t - t_0)$. \square

Toto tvrzení umožňuje rozhodnout, zda lze každé řešení rovnice (17.3) prodloužit do nekonečna, aniž bychom toto řešení znali.

17.4.9 Věta (o spojitě závislosti řešení na počátečních podmínkách a parametrech)

Buď Ω otevřená množina v \mathbb{R}^{1+n+m} a nechť funkce $\mathbf{g} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ je taková, že pro všechna $(\tau, \xi, \lambda) \in \Omega$, $\tau \in \mathbb{R}$, $\xi \in \mathbb{R}^n$, $\lambda \in \mathbb{R}^m$ má počáteční problém

$$\mathbf{x}' = \mathbf{g}(t, \mathbf{x}, \lambda), \quad \mathbf{x}(\tau) = \xi$$

právě jedno úplné řešení $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t; \tau, \xi, \lambda)$. Pak toto řešení, chápané jako zobrazení $\mathbb{R}^{1+1+n+m} \rightarrow \mathbb{R}^n$, je spojitě.

D.: Viz Kalas, Ráb: Obyčejné diferenciální rovnice, str. 82–83. \square

Tato věta říká, že změní-li se málo funkce \mathbf{f} v rovnici (17.3) a málo se změní počáteční podmínka (17.4), pak se řešení nového — změněného — problému liší na konečném intervalu málo od řešení původního problému.

17.5 Systémy lineárních ODR

17.5.1 Poznámky

1. Normy vektorů a matic

Normu vektoru $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ definujeme předpisem $|\mathbf{x}| = \sum_{i=1}^n |x_i|$.

Normu matice $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$ definujeme předpisem $|A| = \sum_{i,j=1}^n |a_{ij}|$.

Na množině vektorů zavádíme metriku $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$,
na množině matic zavádíme metriku $\rho(A, B) = |A - B|$.

2. Platí: $|A \cdot \mathbf{x}| \leq |A| |\mathbf{x}|$.

D.: Pro libovolné $i, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ je $|a_{ik}| \leq \sum_{j=1}^n |a_{ij}|$. Odtud plyne

$$\begin{aligned} |A\mathbf{x}| &= \left| \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} x_k \right) \right| = \sum_{i=1}^n \left| \sum_{k=1}^n a_{ik} x_k \right| \leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |a_{ik}| |x_k| = \sum_{k=1}^n \left(|x_k| \sum_{i=1}^n |a_{ik}| \right) \\ &\leq \sum_{k=1}^n \left(|x_k| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \right) = \left(\sum_{k=1}^n |x_k| \right) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \right). \end{aligned}$$

□

3. Vektorové a maticové funkce

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} = (x_i(t)), \quad \frac{d\mathbf{x}}{dt}(t) = \mathbf{x}'(t) = (x'_i(t)), \quad \int_{t_0}^t \mathbf{x}(s) ds = \begin{pmatrix} \int_{t_0}^t x_1(s) ds \\ \int_{t_0}^t x_2(s) ds \\ \vdots \\ \int_{t_0}^t x_n(s) ds \end{pmatrix}$$

$$A(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \dots & a_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \dots & a_{nn}(t) \end{pmatrix} = (a_{ij}(t)),$$

$$\frac{dA}{dt}(t) = A'(t) = (a'_{ij}(t)), \quad \int_{t_0}^t A(s) ds = \begin{pmatrix} \int_{t_0}^t a_{1,j}(s) ds \\ \int_{t_0}^t a_{2,j}(s) ds \\ \vdots \\ \int_{t_0}^t a_{n,j}(s) ds \end{pmatrix}$$

Vektorová (maticová) funkce je spojitá, jsou-li všechny její složky spojité.

Systém lineárních obyčejných diferenciálních rovnic je tvaru

$$\begin{aligned} x'_1(t) &= a_{11}(t)x_1 + a_{12}(t)x_2 + \dots + a_{1n}(t)x_n + b_1(t) \\ x'_2(t) &= a_{21}(t)x_1 + a_{22}(t)x_2 + \dots + a_{2n}(t)x_n + b_2(t) \\ &\vdots \\ x'_n(t) &= a_{n1}(t)x_1 + a_{n2}(t)x_2 + \dots + a_{nn}(t)x_n + b_n(t) \end{aligned}$$

Při označení

$$A(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \dots & a_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \dots & a_{nn}(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b}(t) = \begin{pmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \\ \vdots \\ b_n(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix}$$

lze tento systém zapsat v maticovém tvaru

$$\mathbf{x}' = A(t) \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}(t). \quad (17.11)$$

Tuto rovnici nazýváme nehomogenní lineární rovnicí. Spolu s rovnicí 17.11 budeme uvažovat počáteční podmínku

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^0. \quad (17.12)$$

17.5.2 Věta o existenci a jednoznačnosti řešení

Nechť maticová funkce $A = A(t)$ a vektorová funkce $\mathbf{b} = \mathbf{b}(t)$ jsou spojité na intervalu $J \subseteq \mathbb{R}$. Pak má počáteční problém (17.11), (17.12) právě jedno řešení, které existuje na celém intervalu J .

D.: Vzhledem k 17.3.2 a 17.4.3 stačí ukázat, že ke každému $\tau \in J$ existuje okolí $\mathcal{O}_\tau \subseteq J$ takové, že funkce $A(t)\mathbf{x} + \mathbf{b}(t)$ je Lipschitzovská vzhledem k \mathbf{x} na $\mathbb{R}^n \times \mathcal{O}_\tau$.

Je-li τ vnitřní bod intervalu J , existuje $a \in \mathbb{R}$, $a > 0$ takové, že $[\tau - a, \tau + a] \subseteq J$.

Položme $L_\tau = \max\{|A(t)| : t \in [\tau - a, \tau + a]\}$ (toto maximum existuje podle 2.2.12), $\mathcal{O}_\tau = (\tau - a, \tau + a)$.

Pak pro každé $t \in \mathcal{O}_\tau$ a každé dva vektory $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ platí podle 17.5.1.2

$$|A(t)\mathbf{x} + \mathbf{b}(t) - (A(t)\mathbf{y} + \mathbf{b}(t))| = |A(t)\mathbf{x} - A(t)\mathbf{y}| = |A(t)(\mathbf{x} - \mathbf{y})| \leq |A(t)| |\mathbf{x} - \mathbf{y}| \leq L_\tau |\mathbf{x} - \mathbf{y}|.$$

Je-li τ pravý krajní bod intervalu J , položíme $\mathcal{O}_\tau = (\tau - a, \tau]$, $L_\tau = \max\{|A(t)| : \tau - a \leq t \leq \tau\}$ a provedeme analogickou úvahu.

Pro levý krajní bod intervalu J provedeme důkaz podobně. \square

17.5.3 Poznámka

Řešení problému (17.11), (17.12) lze hledat jako limitu Picardovy posloupnosti postupných aproximací. Zejména pro $A(t) = A = (a_{ij})$ (konstantní matice) a $\mathbf{b}(t) \equiv 0$ je (označíme-li E jednotkovou matici):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^0(t) &= \mathbf{x}^0 = (x_i^0) \\ \mathbf{x}^1(t) &= \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t A \cdot \mathbf{x}^0 ds = \left(x_i^0 + \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j^0 \right) ds \right) = \left(x_i^0 + \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j^0 (t - t_0) \right) \\ \mathbf{x}^2(t) &= \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} \left(x_k^0 + \sum_{j=1}^n a_{kj} x_j^0 (s - t_0) \right) \right) ds = \\ &= \mathbf{x}^0 + \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} x_k^0 (t - t_0) + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ik} a_{kj} x_j^0 \frac{(t - t_0)^2}{2} \right) = \\ &= \mathbf{x}^0 + A \cdot \mathbf{x}^0 (t - t_0) + (A \cdot A) \cdot \mathbf{x}^0 \frac{(t - t_0)^2}{2} = \left(E + A(t - t_0) + \frac{A^2}{2} (t - t_0)^2 \right) \cdot \mathbf{x}^0 \\ &\vdots \\ \mathbf{x}^k(t) &= \left(E + A(t - t_0) + \frac{A^2}{2!} (t - t_0)^2 + \dots + \frac{A^k}{k!} (t - t_0)^k \right) \cdot \mathbf{x}^0 \\ &\vdots \end{aligned}$$

Rovnici

$$\mathbf{x}' = A(t) \cdot \mathbf{x} \quad (17.13)$$

nazýváme *lineární homogenní rovnici* přidruženou k (17.11).

17.5.4 Věta (princip superpozice)

Jsou-li $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t)$ řešení rovnice (17.13), pak také $c_1\mathbf{x}(t) + c_2\mathbf{y}(t)$, kde c_1, c_2 jsou konstanty, je řešením rovnice (17.13).

$$\text{D.: } \frac{d}{dt}(c_1\mathbf{x} + c_2\mathbf{y}) = c_1\mathbf{x}' + c_2\mathbf{y}' = c_1A(t) \cdot \mathbf{x} + c_2A(t) \cdot \mathbf{y} = A(t) \cdot (c_1\mathbf{x}) + A(t) \cdot (c_2\mathbf{y}) = A(t) \cdot (c_1\mathbf{x} + c_2\mathbf{y}) \quad \square$$

17.5.5 Věta

Je-li maticová funkce $A = A(t) = (a_{ij}(t))_{i,j=1}^n$ spojitá na intervalu J , pak množina všech řešení rovnice (17.13) tvoří n -rozměrný vektorový prostor.

D.: $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{o}$ je řešením rovnice (17.13).

Podle 17.5.4 je libovolná lineární kombinace řešení (17.13) řešením (17.13).

Je-li $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n$ báze n -rozměrného vektorového prostoru a $\mathbf{y}^k = \mathbf{y}^k(t)$ jsou řešení rovnice (17.13) s počátečními podmínkami $\mathbf{y}^k(t_0) = \mathbf{x}^k$, $k = 1, 2, \dots, n$, pak $\mathbf{y}^1(t), \mathbf{y}^2(t), \dots, \mathbf{y}^n(t)$ jsou lineárně nezávislé pro každé $t \in J$:

Kdyby existovalo $t_1 \in J$ a konstanty c_1, c_2, \dots, c_n ne všechny rovny nule takové, že

$$c_1\mathbf{y}^1(t_1) + c_2\mathbf{y}^2(t_1) + \dots + c_n\mathbf{y}^n(t_1) = \mathbf{o},$$

pak by podle 17.5.4 také

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}(t) = c_1\mathbf{y}^1(t) + c_2\mathbf{y}^2(t) + \dots + c_n\mathbf{y}^n(t)$$

bylo řešením rovnice (17.13) s počáteční podmínkou

$$\mathbf{z}(t_1) = \mathbf{o}.$$

Poněvadž ale $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{o}$ je řešením (17.13), vzhledem k jednoznačnosti řešení (sr. 17.5.2) by $\mathbf{z}(t) \equiv \mathbf{o}$.

Zejména tedy $\mathbf{z}(t_0) = c_1\mathbf{y}^1(t_0) + c_2\mathbf{y}^2(t_0) + \dots + c_n\mathbf{y}^n(t_0) = c_1\mathbf{x}^1 + c_2\mathbf{x}^2 + \dots + c_n\mathbf{x}^n = \mathbf{o}$, což

by byl spor s lineární nezávislostí vektorů $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n$.

Dimenze prostoru všech řešení je tedy alespoň n .

Bud' $\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{y}}(t)$ libovolné řešení rovnice (17.13) a položme $\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{y}}(t_0)$. Pak $\tilde{\mathbf{x}} = \kappa_1\mathbf{x}^1 + \kappa_2\mathbf{x}^2 + \dots + \kappa_n\mathbf{x}^n$ pro vhodné konstanty $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$, neboť $\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n$ je báze. To znamená, že

$$\tilde{\mathbf{y}}(t_0) = \kappa_1\mathbf{y}^1(t_0) + \kappa_2\mathbf{y}^2(t_0) + \dots + \kappa_n\mathbf{y}^n(t_0).$$

Podle principu superpozice je

$$\mathbf{z}(t) = \tilde{\mathbf{y}}(t) - \kappa_1\mathbf{y}^1(t) - \kappa_2\mathbf{y}^2(t) - \dots - \kappa_n\mathbf{y}^n(t)$$

také řešením rovnice (17.13); přitom $\mathbf{z}(t_0) = \mathbf{o}$. Vzhledem

k jednoznačnosti řešení rovnice (17.13) je $\mathbf{z}(t) = \mathbf{o}$ pro všechna $t \in J$ a tedy

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \kappa_1\mathbf{y}^1(t) + \kappa_2\mathbf{y}^2(t) + \dots + \kappa_n\mathbf{y}^n(t)$$

pro všechna $t \in J$. To znamená, že funkce

$$\mathbf{y}^1 = \mathbf{y}^1(t), \mathbf{y}^2 = \mathbf{y}^2(t), \dots, \mathbf{y}^n = \mathbf{y}^n(t)$$

tvoří bázi prostoru všech řešení rovnice (17.13). \square

17.5.6 Definice

Libovolná báze prostoru všech řešení rovnice (17.13) se nazývá *fundamentální systém řešení rovnice* (17.13).

Nechť $\mathbf{y}^1 = \mathbf{y}^1(t), \mathbf{y}^2 = \mathbf{y}^2(t), \dots, \mathbf{y}^n = \mathbf{y}^n(t)$ je fundamentální systém řešení rovnice (17.13). Obecné řešení této rovnice je

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = c_1\mathbf{y}^1(t) + c_2\mathbf{y}^2(t) + \dots + c_n\mathbf{y}^n(t).$$

Označme

$$Y = Y(t) = \begin{pmatrix} y_1^1(t) & y_1^2(t) & \dots & y_1^n(t) \\ y_2^1(t) & y_2^2(t) & \dots & y_2^n(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n^1(t) & y_n^2(t) & \dots & y_n^n(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}.$$

Matrice $Y = Y(t)$ se nazývá *fundamentální matice řešení systému* (17.13). Tato matice je v důsledku lineární nezávislosti sloupců regulární, $\det Y(t) \neq 0$ pro každé $t \in J$. Obecné řešení rovnice (17.13) lze zapsat

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c}.$$

Partikulární řešení počátečního problému (17.11), (17.12) je $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c}^0$, kde $\mathbf{c}^0 = Y(t_0)^{-1} \cdot \mathbf{x}^0$. Tedy

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = Y(t) \cdot Y(t_0)^{-1} \cdot \mathbf{x}^0.$$

Pro fundamentální matici řešení systému (17.13) $Y = Y(t)$ zřejmě platí $Y'(t) = A(t) \cdot Y(t)$.

17.5.7 Věta

Obecné řešení rovnice (systému) (17.11) je součtem obecného řešení přidružené homogenní rovnice (17.13) a nějakého partikulárního řešení rovnice (17.11):

$$\mathbf{x}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c} + \tilde{\mathbf{x}}(t),$$

kde $Y(t)$ je fundamentální matice řešení rovnice (17.13) a $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ je libovolné řešení rovnice (17.11).

D.: $\mathbf{x}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c} + \tilde{\mathbf{x}}(t)$ je řešením rovnice (17.11), neboť $\mathbf{x}' = Y' \cdot \mathbf{c} + \tilde{\mathbf{x}}' = A \cdot Y \cdot \mathbf{c} + A \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{b} = A \cdot (Y \cdot \mathbf{c} + \tilde{\mathbf{x}}) + \mathbf{b}$.
Řešení problému (17.11), (17.12) je $\mathbf{x}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c}^0 + \tilde{\mathbf{x}}(t)$, kde $\mathbf{c}^0 = Y(t_0)^{-1}(\mathbf{x}^0 - \tilde{\mathbf{x}}(t_0))$. \square

17.5.8 Nalezení partikulárního řešení rovnice (17.11) — metoda variace konstant

Řešení rovnice (17.11) hledáme ve tvaru $\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}}(t) = Y(t) \cdot \mathbf{c}(t)$, kde $\mathbf{c} = \mathbf{c}(t)$ je nějaká vektorová funkce. Pak

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}' &= Y' \cdot \mathbf{c} + Y \cdot \mathbf{c}' = A \cdot Y \cdot \mathbf{c} + Y \cdot \mathbf{c}' \\ \tilde{\mathbf{x}}' &= A \cdot \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{b} = A \cdot Y \cdot \mathbf{c} + \mathbf{b} \end{aligned}$$

Odtud

$$\begin{aligned} Y(t) \cdot \mathbf{c}'(t) &= \mathbf{b}(t) \\ \mathbf{c}'(t) &= Y(t)^{-1} \cdot \mathbf{b}(t) \\ \mathbf{c}(t) &= \boldsymbol{\eta} + \int_{t_0}^t Y(s)^{-1} \mathbf{b}(s) ds, \end{aligned}$$

kde $\boldsymbol{\eta}$ je konstantní vektor.

Obecným řešením rovnice (17.11) je tedy

$$\mathbf{x}(t) = Y(t) \cdot \boldsymbol{\eta} + \int_{t_0}^t Y(t) \cdot Y(s)^{-1} \cdot \mathbf{b}(s) ds.$$

Aby toto řešení splňovalo počáteční podmínku (17.12), musí platit $\mathbf{x}^0 = Y(t_0) \cdot \boldsymbol{\eta}$, neboli $\boldsymbol{\eta} = Y(t_0)^{-1} \cdot \mathbf{x}^0$.
Řešení počátečního problému (17.11), (17.12) je tedy

$$\mathbf{x}(t) = Y(t) \cdot Y(t_0)^{-1} \cdot \mathbf{x}^0 + \int_{t_0}^t Y(t) \cdot Y(s)^{-1} \cdot \mathbf{b}(s) ds.$$

17.6 Lineární diferenciální rovnice vyššího řádu

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t)x^{(n-1)} + a_{n-2}(t)x^{(n-2)} + \dots + a_1(t)x' + a_0(t)x = f(t), \quad (17.14)$$

funkce $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_1, a_0, f$ jsou definované na nějakém intervalu $J \subseteq \mathbb{R}$.

Je-li $f(t) \equiv 0$, rovnice se nazývá *homogenní*, v opačném případě *nehomogenní*.

Rovnice

$$x^{(n)} + a_{n-1}(t)x^{n-1} + a_{n-2}(t)x^{n-2} + \dots + a_1(t)x' + a_0(t)x = 0 \quad (17.15)$$

se nazývá *přidružená homogenní rovnice k rovnici (17.14)*.

Spolu s rovnicí (17.14) uvažujeme počáteční podmínky

$$x(t_0) = x_0, \quad x'(t_0) = x_0^1, \quad \dots, \quad x^{(n-1)}(t_0) = x_0^{n-1}. \quad (17.16)$$

Podle 17.1.10 je rovnice (17.14) ekvivalentní s vektorovou rovnicí (se systémem rovnic)

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= x_3 \\ &\vdots \\ x_{n-1}' &= x_n \\ x_n' &= -a_{n-1}(t)x_n - a_{n-2}(t)x_{n-1} - \dots - a_1(t)x_2 - a_0(t)x_1 + f(t) \end{aligned}$$

Odtud a z 17.5.2, 17.5.4 a 17.5.5 plynou

17.6.1 Věta (o existenci a jednoznačnosti řešení)

Jsou-li všechny funkce $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, f$ spojité na intervalu $J \subseteq \mathbb{R}$ a $t_0 \in J$, pak má počáteční problém (17.14), (17.16) právě jedno řešení, které existuje na celém intervalu J .

17.6.2 Věta (princip superpozice)

Jsou-li $x = x(t)$, $y = y(t)$ řešením homogenní lineární rovnice (17.15) a c_1, c_2 jsou libovolné konstanty, pak také $z = z(t) = c_1x(t) + c_2y(t)$ je řešením této rovnice.

17.6.3 Věta

Jsou-li všechny funkce a_0, a_1, \dots, a_{n-1} spojité na intervalu $J \subseteq \mathbb{R}$, pak množina všech řešení rovnice (17.15) tvoří n -rozměrný vektorový prostor.

17.6.4 Definice

Báze $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_n = x_n(t)$ vektorového prostoru všech řešení rovnice (17.15) se nazývá *fundamentální systém řešení rovnice (17.15)*.

Řešení $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_k = x_k(t)$ rovnice (17.14) jsou lineárně nezávislá na intervalu J , jsou-li vektory

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_1'(t) \\ \vdots \\ x_1^{(n-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x_2(t) \\ x_2'(t) \\ \vdots \\ x_2^{(n-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad \begin{pmatrix} x_k(t) \\ x_k'(t) \\ \vdots \\ x_k^{(n-1)}(t) \end{pmatrix},$$

lineárně nezávislé pro každé $t \in J$.

Tvoří-li funkce $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_n = x_n(t)$ fundamentální systém řešení rovnice (17.15), pak obecné řešení této rovnice je $x = x(t) = c_1x_1(t) + c_2x_2(t) + \dots + c_nx_n(t)$, kde c_1, c_2, \dots, c_n jsou konstanty.

17.6.5 Definice

Budte $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$ funkce. Funkce

$$W = W(t) = W(t; \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m) = \det \begin{pmatrix} \varphi_1(t) & \varphi_2(t) & \dots & \varphi_m(t) \\ \varphi_1'(t) & \varphi_2'(t) & \dots & \varphi_m'(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1^{(m-1)}(t) & \varphi_2^{(m-1)}(t) & \dots & \varphi_m^{(m-1)}(t) \end{pmatrix}$$

se nazývá *wronskián* funkcí $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$.

17.6.6 Věta

Funkce $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_n = x_n(t)$ tvoří fundamentální systém řešení rovnice (17.15) právě tehdy, když každé z nich je řešením této rovnice a jejich wronskián je v nějakém bodě intervalu J nenulový.

D.: plyne z poznámek za 17.5.6. \square

Z jednoznačnosti řešení rovnice (17.15) také plyne, že je-li wronskián řešení rovnice 17.15 nenulový v jednom bodě intervalu J , pak je nenulový ve všech bodech intervalu J .

17.6.7 Věta

Buď x_1, x_2, \dots, x_n fundamentální systém řešení rovnice (17.15). Obecné řešení rovnice (17.14) je

$$x = x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t) + \dots + c_n x_n(t) + \tilde{x}(t),$$

kde c_1, c_2, \dots, c_n jsou konstanty a \tilde{x}_n je libovolné partikulární řešení rovnice (17.14).

D.: plyne z 17.5.7. \square

17.6.8 Metoda variace konstant

Řešení rovnice (17.14) hledáme ve tvaru

$$\tilde{x} = \tilde{x}(t) = c_1(t)x_1(t) + c_2(t)x_2(t) + \dots + c_n(t)x_n(t),$$

kde $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ jsou funkce a $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ je fundamentální systém řešení rovnice (17.15).

O funkcích c_1, c_2, \dots, c_n budeme předpokládat, že splňují systém rovnic

$$\begin{aligned} c_1' x_1 + c_2' x_2 + \dots + c_n' x_n &= 0 \\ c_1' x_1' + c_2' x_2' + \dots + c_n' x_n' &= 0 \\ &\vdots \\ c_1' x_1^{(n-2)} + c_2' x_2^{(n-2)} + \dots + c_n' x_n^{(n-2)} &= 0 \end{aligned} \tag{17.17}$$

Pak

$$\begin{aligned} \tilde{x}' &= c_1' x_1 + c_1 x_1' + \dots + c_n' x_n + c_n x_n' = c_1 x_1' + \dots + c_n x_n' \\ \tilde{x}'' &= c_1' x_1' + c_1 x_1'' + \dots + c_n' x_n' + c_n x_n'' = c_1 x_1'' + \dots + c_n x_n'' \\ &\vdots \\ \tilde{x}^{(n-1)} &= c_1 x_1^{(n-1)} + \dots + c_n x_n^{(n-1)} \\ \tilde{x}^{(n)} &= c_1' x_1^{(n-1)} + c_1 x_1^{(n)} + \dots + c_n' x_n^{(n-1)} + c_n x_n^{(n)} \end{aligned}$$

Současně ale platí

$$\begin{aligned} \tilde{x}^{(n)} &= -a_{n-1}(t)\tilde{x}^{(n-1)} - a_{n-2}(t)\tilde{x}^{(n-2)} - \dots - a_1(t)\tilde{x}' - a_0(t)\tilde{x} + f(t) = \\ &= -a_{n-1}(c_1 x_1^{(n-1)} + \dots + c_n x_n^{(n-1)}) - \dots - a_1(c_1 x_1' + \dots + c_n x_n') - a_0(c_1 x_1 + \dots + c_n x_n) + f = \\ &= c_1(-a_{n-1}x_1^{(n-1)} - \dots - a_1 x_1' - a_0 x_1) + \dots + c_n(-a_{n-1}x_n^{(n-1)} - \dots - a_1 x_n' - a_0 x_n) + f = \\ &= c_1 x_1^{(n)} + \dots + c_n x_n^{(n)} + f. \end{aligned}$$

(Poslední rovnost plyne z toho, že x_1, x_2, \dots, x_n jsou řešeními přidružené homogenní rovnice.)

Celkem tedy dostaneme

$$c_1' x_1^{(n-1)} + \dots + c_n' x_n^{(n-1)} = f \tag{17.18}$$

Systém rovnic (17.17) a (17.18) je soustava n lineárních rovnic pro n neznámých c_1', c_2', \dots, c_n' . Determinant této soustavy je wronskián fundamentálního systému řešení rovnice (17.15), je tedy podle 17.6.6 různý od 0 a systém rovnic (17.17), (17.18) má jediné řešení $c_1'(t) = \varphi_1(t), c_2'(t) = \varphi_2(t), \dots, c_n'(t) = \varphi_n(t)$. Integrací těchto rovnic určíme $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$.

17.6.9 Homogenní lineární rovnice s konstantními koeficienty

$$x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + a_{n-2}x^{(n-2)} + \dots + a_1x' + a_0x = 0. \quad (17.19)$$

Řešení předpokládáme ve tvaru $x(t) = e^{\lambda t}$. Pak

$$x'(t) = \lambda e^{\lambda t}, \quad x''(t) = \lambda^2 e^{\lambda t}, \quad \dots, \quad x^{(n)}(t) = \lambda^n e^{\lambda t}$$

a tedy

$$\begin{aligned} \lambda^n e^{\lambda t} + a_{n-1}\lambda^{n-1}e^{\lambda t} + a_{n-2}\lambda^{n-2}e^{\lambda t} + \dots + a_1\lambda e^{\lambda t} + a_0e^{\lambda t} &= 0 \\ \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + a_{n-2}\lambda^{n-2} + \dots + a_1\lambda + a_0 &= 0. \end{aligned}$$

Poslední rovnice se nazývá *charakteristická rovnice* lineární diferenciální rovnice (17.19)

- (i) Jsou-li λ_1, λ_2 dva různé kořeny charakteristické rovnice, pak $x_1(t) = e^{\lambda_1 t}, x_2(t) = e^{\lambda_2 t}$ jsou lineárně nezávislá řešení rovnice (17.19).

D.: Že to jsou řešení, je vidět z předchozí úvahy, lineárně nezávislé jsou proto, že vektory

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_1 \\ \lambda_1^2 \\ \vdots \\ \lambda_1^{n-1} \end{pmatrix} \text{ a } \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_2^2 \\ \vdots \\ \lambda_2^{n-1} \end{pmatrix} \text{ jsou pro } \lambda_1 \neq \lambda_2 \text{ lineárně nezávislé. } \square$$

- (ii) Je-li λ_0 k -násobný kořen charakteristické rovnice, pak funkce $x_1(t) = e^{\lambda_0 t}, x_2(t) = te^{\lambda_0 t}, x_3(t) = t^2e^{\lambda_0 t}, \dots, x_k(t) = t^{k-1}e^{\lambda_0 t}$ jsou lineárně nezávislá řešení rovnice (17.19).

D.: Jsou-li $e^{\lambda_0 t}, e^{\lambda_1 t}$ řešení rovnice (17.19), pak podle 17.6.2 je také funkce $\frac{e^{\lambda_0 t} - e^{\lambda_1 t}}{\lambda_0 - \lambda_1}$ řešením rovnice (17.19). Limitním přechodem $\lambda_1 \rightarrow \lambda_0$ s využitím 2.5.6 dostaneme, že $\frac{0 - te^{\lambda_0 t}}{-1} = te^{\lambda_0 t}$ je také řešením (17.19) (sr. 17.4.9).

Analogicky lze ukázat, že také $t^2e^{\lambda_0 t}, t^3e^{\lambda_0 t}, \dots, t^{k-1}e^{\lambda_0 t}$ jsou řešení rovnice (17.19).

Dále je

$$\begin{aligned} W(0; e^{\lambda_0 t}, te^{\lambda_0 t}, t^2e^{\lambda_0 t}, \dots, t^{k-1}e^{\lambda_0 t}) &= \\ = \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_0^2 & 2\lambda_0 & 2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_0^{k-1} & (k-1)\lambda_0^{k-2} & 2 \binom{k-1}{2} & \dots & \ell! \binom{k-1}{\ell} \lambda_0^{k-\ell-1} & \dots & (k-1)! \end{pmatrix} &\neq 0, \end{aligned}$$

takže funkce $x_1(t) = e^{\lambda_0 t}, x_2(t) = te^{\lambda_0 t}, x_3(t) = t^2e^{\lambda_0 t}, \dots, x_k(t) = t^{k-1}e^{\lambda_0 t}$ jsou lineárně nezávislé. \square

- (iii) Jsou-li $\lambda_1 = \alpha + i\beta, \lambda_2 = \alpha - i\beta$ k -násobné komplexně sdružené kořeny charakteristické rovnice, pak

$$x_1(t) = e^{\alpha t} \cos \beta t, \quad x_2(t) = te^{\alpha t} \cos \beta t, \quad x_3(t) = t^2e^{\alpha t} \cos \beta t, \dots, \quad x_k(t) = t^{k-1}e^{\alpha t} \cos \beta t,$$

$$x_{k+1}(t) = e^{\alpha t} \sin \beta t, \quad x_{k+2}(t) = te^{\alpha t} \sin \beta t, \quad x_{k+3}(t) = t^2e^{\alpha t} \sin \beta t, \dots, \quad x_{2k}(t) = t^{k-1}e^{\alpha t} \sin \beta t$$

jsou lineárně nezávislá řešení rovnice (17.19).

D.: $t^\ell e^{(\alpha+i\beta)t}, t^\ell e^{(\alpha-i\beta)t}, 0 \leq \ell < k$ jsou lineárně nezávislá řešení rovnice (17.19) podle (ii). Tedy také

$$\begin{aligned} x_{\ell+1}(t) &= \frac{1}{2} \left(t^\ell e^{(\alpha+i\beta)t} + t^\ell e^{(\alpha-i\beta)t} \right) = t^\ell e^{\alpha t} \cos \beta t \\ x_{k+\ell+1}(t) &= \frac{1}{2} \left(t^\ell e^{(\alpha+i\beta)t} - t^\ell e^{(\alpha-i\beta)t} \right) = t^\ell e^{\alpha t} \sin \beta t \end{aligned}$$

jsou lineárně nezávislá řešení rovnice (17.19). \square

17.6.10 Eulerova rovnice $t^n x^{(n)} + a_{n-1}t^{n-1}x^{(n-1)} + a_{n-2}t^{n-2}x^{(n-2)} + \dots + a_1tx' + a_0x = f(t)$

Zavedeme substituci $t = e^\tau$, tj. $\tau = \ln t$. Pak

$$\begin{aligned} x' &= \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\tau} \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{t} \frac{dx}{d\tau} \\ x'' &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{t} \frac{dx}{d\tau} \right) = -\frac{1}{t^2} \frac{dx}{d\tau} + \frac{1}{t} \frac{d^2x}{d\tau^2} \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{t^2} \left(\frac{d^2x}{d\tau^2} - \frac{dx}{d\tau} \right) \\ x''' &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{t^2} \left(\frac{d^2x}{d\tau^2} - \frac{dx}{d\tau} \right) \right) = -\frac{2}{t^3} \left(\frac{d^2x}{d\tau^2} - \frac{dx}{d\tau} \right) + \frac{1}{t^2} \left(\frac{d^3x}{d\tau^3} - \frac{d^2x}{d\tau^2} \right) \frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{t^3} \left(\frac{d^3x}{d\tau^3} - 3\frac{d^2x}{d\tau^2} + 2\frac{dx}{d\tau} \right) \\ &\vdots \end{aligned}$$

Dosadíme-li do dané rovnice, vypadnou faktory t, t^2, \dots, t^n , takže dostaneme rovnici s konstantními koeficienty.

17.6.11 Riccatiho rovnice $x' = P(t)x^2 + Q(t)x + R(t)$

Zavedeme substituci $x(t) = -\frac{y'(t)}{P(t)y(t)}$. Pak $x' = -\frac{Py y'' - (P'y + Py')y'}{P^2 y^2} = -\frac{y''}{Py} + \frac{P'y'}{P^2 y} + \frac{y'^2}{Py^2}$
a tedy

$$\begin{aligned} -\frac{y''}{Py} + \frac{P'y'}{P^2 y} + \frac{y'^2}{Py^2} &= \frac{Py'^2}{P^2 y^2} - \frac{Qy'}{Py} + R \\ -\frac{y''}{Py} + \frac{1}{Py} \left(\frac{P'}{P} + Q \right) y' - R &= 0 \\ y'' - \left(\frac{P'}{P} + Q \right) y' - PRy &= 0, \end{aligned}$$

což je lineární homogenní rovnice druhého řádu.

17.6.12 Nalezení fundamentálního systému řešení rovnice $x'' + P(t)x' + Q(t)x = 0$
v případě, že jedno řešení je známé

Předpokládejme, že známe jedno nekonstantní řešení $x_1 = x_1(t)$ dané rovnice. Zavedeme substituci

$$x(t) = x_1(t)y(t).$$

Pak $x' = x_1'y + x_1y'$, $x'' = x_1''y + 2x_1'y' + x_1y''$, tedy

$$\begin{aligned} x_1''y + 2x_1'y' + x_1y'' + Px_1'y + Px_1y' + Qx_1y &= 0 \\ x_1y'' + (2x_1' + Px_1)y' + (x_1'' + Px_1' + Qx_1)y &= 0 \\ y'' + \left(P + 2\frac{x_1'}{x_1} \right) y' &= 0, \end{aligned}$$

což je rovnice typu 17.2.9 pro neznámou funkci $y = y(t)$.

Položíme $z(t) = y'(t)$. Pak

$$\begin{aligned} z' &= - \left(P(t) + 2\frac{x_1'(t)}{x_1(t)} \right) z \\ \ln z &= \int \frac{dz}{z} = - \int \left(P(t) + 2\frac{x_1'(t)}{x_1(t)} \right) dt = - \int P(t)dt - \ln(x_1(t))^2 \\ z(t) &= \frac{1}{(x_1(t))^2} e^{-\int P(t)dt}. \end{aligned}$$

Odtud plyne, že

$$y(t) = \int \frac{1}{(x_1(t))^2} e^{-\int P(t)dt} dt$$

a tedy druhé řešení dané rovnice je

$$x_2(t) = x_1(t) \int \frac{1}{(x_1(t))^2} e^{-\int P(t)dt} dt.$$

Poněvadž platí

$$W(t, x_1, x_2) = \begin{vmatrix} x_1 & x_1 \int \frac{1}{x_1^2} e^{-\int P} \\ x_1' & x_1' \int \frac{1}{x_1^2} e^{-\int P} + \frac{1}{x_1} e^{-\int P} \end{vmatrix} = e^{-\int P(t)dt} > 0,$$

tak $x_1 = x_1(t)$, $x_2 = x_2(t)$ tvoří fundamentální systém řešení dané rovnice.

17.7 Cvičení

Řešte rovnice (Cauchyovy úlohy)

- | | |
|--|--|
| 1) $2t(2x - 3)dt + (t^2 + 1)dx = 0$ | 2) $\frac{dx}{dt} = e^{t-x}$ |
| 3) $te^x dx + \frac{t^2 + 1}{x} dt = 0$ | 4) $\sqrt{1 + t^2} dx + \sqrt{x^2 - 1} dt = 0$ |
| 5) $t^2 dx + (x^2 - tx)dt = 0$ | 6) $\frac{dt}{dx} = \frac{t + x}{x - t}$ |
| 7) $\left(t \sin \frac{x}{t} - x \cos \frac{x}{t}\right) dt + t \cos \frac{x}{t} dx = 0$ | 8) $2 \frac{dx}{dt} - x = e^{t/2}$ |
| 9) $t dx + x dt = \sin t dt$ | 10) $(t - 1)^3 x' + 4(t - 1)^2 x = t + 1$ |
| 11) $e^{2x} dt + 2(te^{2x} - x)dx = 0$ | 12) $(x^2 + 1)dt + (2tx + 1)dx = 0$ |
| 13) $(t + x)dt + (t + x^2)dx = 0$ | 14) $t dx - x dt + t^3 dt = 0$ |
| 15) $(t^2 + t - x)dt + t dx = 0$ | 16) $(\cos t + x \cos t)dt + dx = 0; x(\pi/2) = 0$ |
| 17) $x' + 2x = t; x(0) = 2$ | 18) $(t + 2x)dt + (x + 2t)dx = 0; x(1) = 1$ |
- 19) Určete konstanty a, b, c tak, aby rovnice $(at^2 + bx^2)dt + ct dx = 0$ byla exaktní a vyřešte ji.

Řešte rovnice

- 20) $\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = 0$ 21) $x'' + tx' = 0$ 22) $tx''' - 2x'' = 0$

23) Předmět o hmotnosti m je v čase $t_0 = 0$ shozen s věže. Odpor vzduchu je přímo úměrný rychlosti jeho pádu. Určete, jakou dráhu urazí za čas t .

Ukažte, že $x = u(t)$ je řešením dané rovnice a rovnici vyřešte.

- 24) $u = t^2; t^2 x'' - 2x = 0$ 25) $u = \sqrt{t}; x'' + \frac{x}{4t^2} = 0 (t > 0)$

Řešte rovnice (Cauchyovy úlohy)

- | | | |
|----------------------------|---|---|
| 26) $x'' + 2x = 0$ | 27) $x'' + 6x' + 5x = 0$ | 28) $x'' + 6x' + 9x = 0$ |
| 29) $x'' - 2x' + 4x = 0$ | 30) $x'' - x = 0; x(0) = 1, x'(0) = -2$ | 31) $x'' + 4x = 0; x(0) = 0, x'(0) = 2$ |
| 32) $x'' + x' = t$ | 33) $x'' + x = \sin t$ | 34) $x'' - x = e^t$ |
| 35) $x'' - 3x' - 10x = -3$ | 36) $x'' - x' = \sin t$ | 37) $x'' - 3x' = e^{3t} - 12t$ |
| 38) $x'' + x = \cot g t$ | 39) $x'' - 8x' = e^{8t}$ | 40) $x'' + 2x' = t^2 - e^t$ |

Řešte systémy rovnic

- | | |
|--|--|
| 41) $x' = -2x + y$ $y' = 3x - 4y$ | 42) $x' = -x - \frac{2}{3}y + \frac{1}{3}e^t$ $y' = \frac{4}{3}x + y - t$ |
| 43) $x' + 3x + 2y = 5 \sin t$ $y' - 2x + 7y = 8 \cos t$ | 44) $4x' + 9y' + 2x + 31y = e^t$ $3x' + 7y' + x + 24y = 3$ |

Výsledky: 1) $x = \frac{3}{2} + \frac{C}{(t^2 + 1)^2}$ 2) $e^x = e^t + C$ 3) $e^x(x - 1) + \frac{t^2}{2} + \ln|t| = C$ 4) $(x + \sqrt{x^2 - 1})(t + \sqrt{t^2 + 1}) = C$

5) $x = \frac{t}{\ln|t| + C}$ 6) $\frac{1}{2} \ln(t^2 + x^2) + \operatorname{arctg} \frac{x}{t} = C$ 7) $x = t \arcsin \frac{C}{t}$ 8) $x = \frac{t + C}{2} e^{t/2}$ 9) $x = \frac{C - \cos t}{t}$

10) $x = \frac{t^3 - 3t + C}{3(t - 1)^4}$ 11) $t = \frac{x^2 + C}{2} e^{-2x}$ 12) $t = \frac{C - x}{x^2 + 1}$ 13) $\frac{t^2}{2} + tx + \frac{x^3}{3} = C$ 14) $x = Ct - \frac{t^3}{2}$ 15) $x = Ct - t^2 - t \ln|t|$

16) $x = e^{1 - \sin t} - 1$ 17) $x = \frac{t}{2} + \frac{9}{4} e^{-2t} - \frac{1}{4}$ 18) $t^2 + 4tx + x^2 = 6$ 19) $c = 2b; \frac{at^3}{3} + btx^2 = C$ 20) $x = C_1 e^{-t} + C_2$

$$\begin{aligned}
21)x &= C_1 \int e^{-t^2/2} dt + C_2 & 22)x &= C_1 t^4 + C_2 t + C_3 & 23)t &= \frac{mgt}{k} + \frac{m^2 g}{k^2} (e^{-kt/m} - 1) & 24)x &= \frac{C_1}{t} + C_2 t^2 \\
25)x &= \sqrt{t} (C_1 \ln |t| + C_2) & 26)x &= C_1 + C_2 e^{-2t} & 27)x &= C_1 e^{-t} + C_2 e^{-5t} & 28)x &= (C_1 + C_2 t) e^{-3t} \\
29)x &= e^t (C_1 \cos \sqrt{3}t + C_2 \sin \sqrt{3}t) & 30)x &= \frac{3e^{-t} - e^t}{2} & 31)x &= \sin 2t & 32)x &= C_1 + C_2 e^{-t} + \frac{t^2}{2} - t \\
33)x &= C_1 \cos t + C_2 \sin t - \frac{t \cos t}{2} & 34)x &= C_1 e^t + C_2 e^{-t} + \frac{te^t}{2} & 35)x &= C_1 e^{5t} + C_2 e^{-2t} + \frac{3}{10} \\
36)x &= C_1 + C_2 e^t + \frac{\cos t - \sin t}{2} & 37)x &= C_1 + C_2 e^{3t} + 2t^2 + \frac{te^{3t} + 4t}{3} & 38)x &= C_1 \cos t + C_2 \sin t - \sin t \ln \left| \frac{1 + \cos t}{\sin t} \right| \\
39)x &= C_1 + \left(C_2 + \frac{t}{8} \right) e^{8t} & 40)x &= C_1 + C_2 e^{-2t} + \frac{t^3}{6} - \frac{t^2}{4} + \frac{t}{4} - \frac{e^t}{3} & 41)x &= Ae^{-t} + Be^{-5t}, y = Ae^{-t} - 3Be^{-5t} \\
42)x &= Ae^{t/3} + Be^{-t/3} - 6t, y = -2Ae^{t/3} - Be^{-t/3} + 9t + \frac{1}{2}e^t + 9 \\
43)x &= Ae^{-5t} + Bte^{-5t} + \frac{365}{338} \sin t - \frac{307}{338} \cos t, y = \frac{2A-B}{2} e^{-5t} + Bte^{-5t} + \frac{144}{338} \sin t + \frac{278}{338} \cos t \\
44)x &= e^{-4t} (A \cos t + B \sin t) + \frac{31}{26} e^t - \frac{93}{17}, y = e^{-4t} ((B-A) \cos t - (B+A) \sin t) - \frac{2}{13} e^t + \frac{6}{17}
\end{aligned}$$

17.8 Kontrolní otázky

- 1) **Uvedte Definiční x.y.z;**
 - definici (definovaný pojem) vysvětlete
 - ilustруйте na příkladě, příp. náčrtem
 - presentujte přehled základních vlastností
 - charakterizujte teoretický význam a případné praktické užití
- 2) **Formulujte Větu x.y.z;**
 - vysvětlete předpoklady
 - vysvětlete tvrzení
 - větu ilustруйте příkladem, příp. náčrtem
 - uveďte základní kroky důkazu, příp. podrobně dokažte
 - presentujte teoretický a případně praktický význam
- 3) **Vyřešte příklad x.y.z;**
 - popište jednotlivé kroky postupu
 - citujte použitá tvrzení
 - postup i jeho jednotlivé kroky zdůvodněte

Kapitola 18

Doplněk

18.1 Eulerova numerická metoda řešení ODR

Uvažujme počáteční problém (17.3), (17.4). Pro malé $h > 0$ platí

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) = \mathbf{x}'(t) \approx \frac{\mathbf{x}(t+h) - \mathbf{x}(t)}{h}.$$

Označme $\mathbf{x}^0 = \mathbf{x}(t_0)$, $\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}(t_0 + h)$, $\mathbf{x}^2 = \mathbf{x}(t_0 + 2h)$, \dots , $\mathbf{x}^k = \mathbf{x}(t_0 + kh)$, \dots Pak je

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^1 &\approx \mathbf{x}^0 + h\mathbf{f}(t_0, \mathbf{x}^0) = \tilde{\mathbf{x}}^1 \\ \mathbf{x}^2 &\approx \mathbf{x}^1 + h\mathbf{f}(t_0 + h, \mathbf{x}^1) \approx \tilde{\mathbf{x}}^1 + \mathbf{f}(t_0 + h, \tilde{\mathbf{x}}^1) \\ &\vdots \\ \mathbf{x}^k &\approx \mathbf{x}^{k-1} + h\mathbf{f}(t_0 + kh, \mathbf{x}^{k-1}) \approx \tilde{\mathbf{x}}^{k-1} + \mathbf{f}(t_0 + kh, \tilde{\mathbf{x}}^{k-1}) \\ &\vdots \end{aligned}$$

Konečná posloupnost $\{\tilde{\mathbf{x}}^k\}_{k=0}^K$ definovaná rekuretně

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}^0 &= \mathbf{x}^0 \\ \tilde{\mathbf{x}}^k &= \tilde{\mathbf{x}}^{k-1} + h\mathbf{f}(t_0 + kh, \tilde{\mathbf{x}}^{k-1}), \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned}$$

aproximuje řešení úlohy (17.3), (17.4) v bodech $t_0, t_0 + h, \dots, t_0 + Kh$.