

# MI-MPI

Souhrn látky

leden 2017

verze 0.1.1


# Obsah

<b>I. Teorie grup (algebra) </b>	<b>5</b>
1. Základní pojmy	5
2. Množiny s jednou binární operací	5
3. Cayleyho tabulka	7
4. Podgrupy	8
5. Cyklické grupy a generátory	9
6. Aditivní grupy $\mathbb{Z}^+$	10
7. Multiplikativní grupy $\mathbb{Z}^\times$	10
8. Eulerova funkce	11
9. Řešený příklad z midtermu	12
10. Základní věty	12
11. Homomorfismus a izomorfismus	13
11.1. Důležité vlastnosti	14
11.2. Věty	14
11.3. Skládání permutací	14
<b>II. Tělesa a okruhy (algebra) </b>	<b>14</b>
12. Úvod	15
13. Okruh (Ring)	15
13.1. Příklady	16
14. Obor integrity	16
14.1. Příklady	16
15. Těleso	16
15.1. Vlastnosti	16
16. Konečné (Galoisovo) těleso	17
16.1. Zápis konečných (binárních) těles	17
16.1.1. Aplikace	17
17. Okruh polynomů nad okruhem/tělesem (Polynomiální okruh)	18
17.1. Definice	18
17.2. Výpočet nad tělesem s ireducibilním polynomem	18
17.2.1. A – Dělením polynomu	18
17.2.2. B – Rozšířeným Euklidovým algoritmem	19

17.2.3. „Klasická“ metoda nalezení inverzního prvku . . . . .	20
17.3. Ireducibilní polynom . . . . .	21
17.4. Ireducibilní polynomy v $\mathbb{Z}_2$ . . . . .	21
17.5. Rozšířený Euklidův algoritmus . . . . .	22
<b>III. Funkce více proměnných</b>	<b>24</b>
<b>18. Derivace</b> 	<b>24</b>
18.1. Definice limity . . . . .	24
18.2. Definice derivace . . . . .	24
18.3. Přehled základních derivací . . . . .	25
18.4. Parciální derivace v bodě $a$ . . . . .	25
18.5. Parciální derivace vyšších řádů . . . . .	26
<b>19. Vyšetření průběhu funkce</b> 	<b>26</b>
19.1. Funkce jedné proměnné . . . . .	26
19.2. Funkce více proměnných . . . . .	27
<b>20. Gradient</b> 	<b>28</b>
20.1. Gradient ve směru a v bodě . . . . .	28
<b>21. Jacobiho matice</b> 	<b>29</b>
<b>22. Hessova matice (Hessián)</b> 	<b>29</b>
<b>23. Definitnost matic</b> 	<b>30</b>
<b>24. Sylvestrovo kritérium</b>	<b>31</b>
<b>25. Kvadratická forma matice</b>	<b>32</b>
<b>26. Tečná rovina</b>	<b>32</b>
<b>IV. Integrál funkce více proměnných</b> 	<b>33</b>
<b>27. Základní pojmy</b>	<b>33</b>
<b>28. Riemannův integrál funkce jedné a více proměnných</b>	<b>33</b>
28.1. Vlastnosti Riemannova integrálu . . . . .	35
<b>29. Newtonův integrál</b>	<b>35</b>
29.1. Primitivní funkce . . . . .	35
29.2. Primitivní funkce elementárních funkcí . . . . .	36
29.3. Newtonova-Leibnizova formule . . . . .	36
<b>30. Dvojný integrál nad obdélníkovou oblastí</b>	<b>36</b>
<b>31. Dvojný integrál nad obecnou oblastí</b>	<b>37</b>
<b>32. Trojný integrál a aplikace</b>	<b>39</b>

<b>V. Teorie grafů</b>	<b>40</b>
<b>33. Párování v grafu</b>	<b>40</b>
33.1. Bipartitní graf . . . . .	40
33.2. Párování v grafu . . . . .	40
33.3. Stabilní párování . . . . .	41
<b>VI. Ostatní</b>	<b>42</b>
<b>34. Modulární aritmetika</b>	<b>42</b>
34.1. Inverzní modulo . . . . .	42
34.2. Lineární kongruentní rovnice . . . . .	43
34.3. Malá Fermatova věta . . . . .	43
34.4. Eulerova věta . . . . .	44
34.5. Čínská věta o zbytcích . . . . .	45
<b>35. Numerická matematika a strojová čísla</b>	<b>47</b>
35.1. IEEE-754 . . . . .	49
35.2. Hladový algoritmus . . . . .	49
<b>36. Numerické metody řešení soustav lineárních rovnic</b>	<b>50</b>
36.1. Přímé metody – Gausova, hornerova . . . . .	50
36.2. Iterační metody . . . . .	51
<b>37. Teorie čísel</b>	<b>52</b>
37.1. Bézoutovy koeficienty . . . . .	52
<b>38. Fuzzy matematika</b>	<b>53</b>
38.1. Vzdálenost a podobnost . . . . .	53
38.2. Fuzzy množiny . . . . .	54
38.2.1. Průnik (součin) fuzzy množin ( $T$ -normy) . . . . .	54
38.2.2. De Morganovy zákony a $T$ -konormy (součet – sjednocení) . . . . .	54
38.3. Kopule . . . . .	55
38.4. Defuzzifikace . . . . .	55
<b>39. Optimalizace</b>	<b>55</b>
39.1. Druhy optimalizačních úloh . . . . .	55

---

Symbolem „“ jsou označeny ty sekce dokumentu, které odpovídají okruhům SZZ 2017.

# Část I.

## Teorie grup (algebra)

### 1. Základní pojmy

**Řád (pod)grupy**  $G = (M, \circ)$  nazýváme počet prvků množiny  $M$ . Je-li  $M$  nekonečná množina, je i řád nekonečný. Podle řádu rozlišujeme konečné a nekonečné grupy. Řád (pod)grupy můžeme značit pomocí „#“.

**Jednoznačné dělení** V každé grupě  $(G, \circ)$  mají pro libovolné  $a, b \in G$  rovnice

$$a \circ x = b \text{ a } y \circ a = b \text{ jediné řešení.}$$

$$\text{A to } x = a^{-1} \circ b \text{ a } y = b \circ a^{-1}.$$

$\mathbb{Z}$  Celá čísla  $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$ .

$\mathbb{N}$  Přirozená čísla  $\{1, 2, 3\}$ .

$\mathbb{N}^0$  Přirozená čísla **včetně** nuly.

**Kleinova grupa** Nejmenší necyklická grupa. Jedná se o direktní součin dvou kopií cyklické grupy řádu 2.

$$V = (\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2, \circ)$$

### 2. Množiny s jednou binární operací

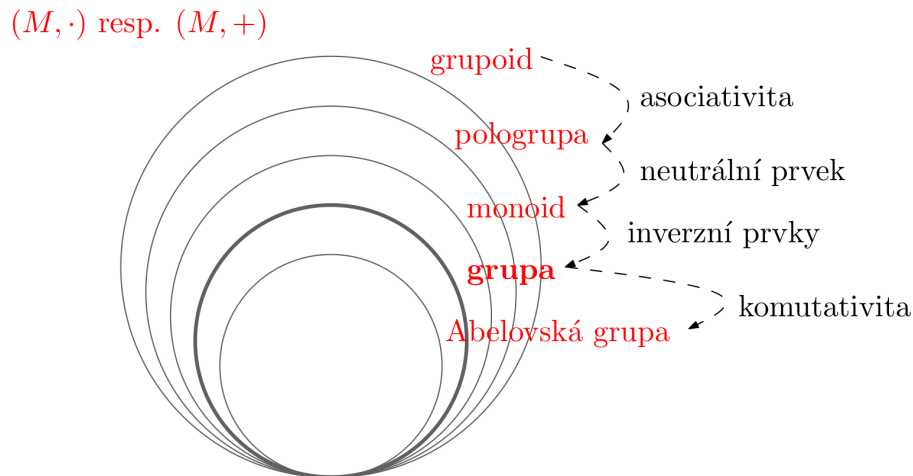
- Důvod, proč se tímto zabýváme: pokud dokážeme nějaké tvrzení pro obecnou strukturu, bude toto tvrzení platit i pro všechny konkrétní struktury, které od ní „dědí“
  - Jedná se tedy o triviální důkaz asociativity

Obecně se jedná o uspořádanou dvojici neprázdná **množina a binární operace**  $\circ$  na ní, která vezme nějaké dva objekty z  $M$  a jednoznačně jim přiřadí jiný objekt.

$$(M, \circ)$$

$$M \circ M \rightarrow M$$

<sup>1</sup>Řešení té rovnice si představuji takto: hledáme, co dosadit za  $x$  resp.  $y$  tak, aby napravo zůstalo jen  $b$ . Využíváme faktu, že  $a \circ a^{-1} = a \circ e = a$ .



Obrázek 1: Hierarchie množin s binární operací a jejich „ANIK“ vlastnosti.

### ANIK

(A sociativita – N eutrální prvek – I nverzní prvky – K omutativita)

**Grupoid**  $M$  je *uzavřená* vůči operaci  $\circ$ , tj. výsledek operace opět náleží do množiny

$$\forall a, b \in M \quad a \circ b \in M$$

**Pologrupa** Je grupoid. Operace je nad  $M$  *asociativní*.

$$\forall a, b, c \in M \quad (a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$$

**Monoid** Je pologrupa. Existuje právě jeden (v každém monoidu) *neutrální prvek*.

$$\exists e \in M \quad \forall a \in M \quad e \circ a = a \circ e = a$$

**Grupa** Je monoid. Všechny prvky (každý prvek) mají právě jeden *inverzní prvek* (říkáme, že  $a^{-1}$  je inverzním prvkem k  $a$ ).

$$\forall a \in M \quad \exists a^{-1} \in M \quad a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$$

Dále platí

- Sdruženost inverzního prvku:  $(a^{-1})^{-1} = a$
- Inverze výsledku operace:  $(a \circ b)^{-1} = a^{-1} \circ b^{-1}$

**Abelovská grupa** Operace  $\circ$  je *komutativní*.

$$\forall a, b \in M \quad a \circ b = b \circ a$$

- Z definice plyne, že každá grupa je monoid, každý monoid je pologrupa a každá

pologrupa je grupoid. Tyto struktury od sebe „dědí“ vlastnosti.

$$\text{grupoid} \supset \text{pologrupa} \supset \text{monoid} \supset \text{grupa}$$

- Pokud máme zadanou dvojici „množina a operace“ zjistíme, o co se jedná, jen postupným testováním všech předchozích vlastností.

### 3. Cayleyho tabulka

Tabulka zachycující vzájemné vztahy všech prvků ve struktuře  $(M, \circ)$ , kde  $M$  má konečný počet prvků. Pokud má množina  $M$  z dvojice  $(M, \circ)$  konečný počet prvků, lze její strukturu (danou operací  $\circ$ ) kompletně zachytit v tzv. *Cayleyho tabulce*.

- **Uzavřenost** poznáme tak, že všechny buňky tabulky obsahují jen prvky z  $M$ .
- **Asociativitu** operace z tabulky poznáme těžko.
- **Neutrální prvek**  $e$  se v Cayleyho tabulce pozná tak, že „jeho“ (prvku) řádek i sloupec je stejný, jako první řádek a sloupec tabulky. [FIXME]: Jedná se o záhlaví tabulky nebo o skutečně první sloupec/řádek?
- **Inverzní prvek** k prvku najdeme, tak že v jeho sloupci a řádku nalezneme neutrální prvek  $e$ .
- **Komutativnost** poznáme tak, že tabulka je symetrická podle hlavní diagonály.

Cayleyho tabulka každé grupy tvoří tzv. *magický čtverec*. Magický čtverec pro  $n$  prvkovou množinu  $M$  je matice  $n \times n$  taková, že v každém řádku i sloupci jsou vždy všechny prvky množiny  $M$ .

#### Příklad Cayleyho tabulky

Uvažujme

$$\mathbb{Z}_4^+ = \{0, 1, 2, 3\}$$

tedy množinu čísel  $\{0, 1, 2, 3\}$  s operací sčítání modulo 4.

+4	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	2	3	0
2	2	3	0	1
3	3	0	1	2

0 je neutrální prvek, její řádek i sloupec se rovnají záhlaví.

$$1^{-1} = 3$$

$$2^{-1} = 2$$

$$3^{-1} = 1$$

Inverze

## 4. Podgrupy

Buď  $G = (M, \circ)$  grupa. Podgrupou grupy  $G$  nazveme libovolnou dvojici  $H = (N, \circ)$  takovou, že

- $N \subset M$ ,
- $H = (N, \circ)$  je grupa.
- **Každý prvek** grupy **generuje podgrupu** (ty se však mohou překrývat).
- V každé grupě  $G = (M, \circ)$  (s alespoň dvěma prvky) existují vždy alespoň dvě *triviální podgrupy*:
  - grupa obsahující pouze neutrální prvek:  $(\{e\}, \circ)$
  - a grupa samotná:  $G = (M, \circ)$ .
- Ostatním podgrupám, které nejsou triviální, se říká netriviální nebo *vlastní podgrupa*.
- Analogie s lineárním prostorem a lineárním podprostorem.
- Neutrální prvek podgrupy je roven neutrálnímu prvku grupy.
- Podgrupa  $H$  grupy  $G$  je její **normální podgrupou** (značíme  $H \trianglelefteq G$ ), pokud pro každé  $a \in G$  platí
$$\forall a \in G, H = aHa^{-1}$$
- Inverze prvku v podgrupě je stejná jako inverze stejného prvku v grupě.
- Průnik podgrup je znovu podgrupou

### Langrangeova<sup>a</sup> věta

Buď  $H$  podgrupa konečné grupy  $G$ . Potom řád  $H$  dělí řád  $G$ . Grupa s prvočíselným řádem má pouze triviální podgrupy.

- Věta neříká, že existuje podgrupa takového řádu. Pokud však nějakou podgrupu nalezneme, musí mít právě řád dělitele.
- Důsledkem je, že grupa prvočíselného řádu má pouze triviální podgrupy.

<sup>a</sup>Fun fact: Joseph-Louis Lagrange je jedním ze 72 významných mužů, jejichž jméno je zapsáno na Eiffelově věži v Paříži.

*Všechny podgrupy mají řád, který dělí řád grupy.*



### Příklad

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}_{15}^\times &= \{1, 2, 4, 7, 8, 11, 13, 14\} \quad (G) \\ \#\mathbb{Z}_{15}^\times &= 8\end{aligned}$$

Podgrupy  $G$  budou:

- Dvě triviální řádu  $\#1 = e = \{1\}$  a  $\# \left( \mathbb{Z}_{15}^\times \right) = \left\{ \mathbb{Z}_{15}^\times \right\}$
- A další (*vlastní*) podgrupy řádů  $\#4$  a  $\#2$ , protože  $(\#4 \text{ a } \#2) \mid 8$ :

$$\langle 7 \rangle = \langle 13 \rangle = \{1, 4, 7, 13\}, \{1, 2, 4, 8\}$$

$$\langle 2 \rangle = \langle 3 \rangle = \{1, 14\}, \{1, 11\}$$

*Generátory podgrupy  $\langle 7 \rangle = \langle 13 \rangle$  generují stejnou podgrupu a  $\langle 2 \rangle = \langle 3 \rangle$  generují stejnou podgrupu.*

## 5. Cyklické grupy a generátory

Tématem se zabývá 3. handout.

Reprezentativním příkladem nekonečné cyklické grupy je grupa celých čísel se sčítáním  $(\mathbb{Z}, +)$ .

Grupa  $G = (M, \circ)$  je cyklická, pokud existuje prvek  $a \in M$  takový, že  $\langle a \rangle = \{a^n \mid n \in \mathbb{N}\} = G$ . Prvek  $a$  je generátor grupy  $G$ .

- V cyklické grupě  $G = (M, \circ)$  řádu  $n$  platí pro všechny prvky  $a \in M$ , že  $a^n = e$ , kde  $e$  je neutrální prvek. Tedy  $G = \{\dots, a^{-2}, a^{-1}, e, a^1, a^2, \dots\}$ .
- Neutrální prvek  $\neq$  generátor.
- Každá cyklická grupa je zároveň Abelovou grupou.
- Grupa prvočíselného řádu (počet prvků je prvočíslo) je cyklická.
- Libovolná podgrupa cyklické grupy je opět cyklická grupa.
- Je-li  $G$  **cyklická** grupa řádu  $n$  a  $a$  nějaký její generátor, potom  $a^k$  je také generátor tehdy, a jen tehdy, když  $k$  a  $n$  jsou nesoudělná (tj.  $\gcd(k, n) = 1$ ).
- $\mathbb{Z}_n^+$  jsou cyklické grupy pro všechna  $n$  a generátorem jsou všechna kladná  $k \leq n$  nesoudělná s  $n$ .
- V cyklické grupě řádu  $n$  je počet generátorů roven  $\varphi(n)$ . Viz [Eulerova funkce](#) na straně 11.

### Příklad – základní ukázka cyklické grupy

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}_4^+ &= \{0, 1, 2, 3\} \\ \#\mathbb{Z}_4^+ &= 4 \\ e &= 0 \\ 2^4 &= (16)_{MOD 4} = 0\end{aligned}$$

## 6. Aditivní grupy $\mathbb{Z}^+$

- Všechny aditivní grupy jsou cyklické.
- Aditivní grupa modulo  $n$  je rovna  $\langle k \rangle$  (generátoru) tehdy, a jen tehdy, když  $k$  a  $n$  jsou nesoudělná čísla.
- Počet prvků grupy  $\mathbb{Z}_{MOD}^+$  je MOD.

### Příklad

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}_{15}^+ &= \{0, 1, 2, 3, \dots, 14\} \\ \mathbb{Z}_{15}^+ &= \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \langle 4 \rangle, \langle 6 \rangle, \langle 7 \rangle, \langle 8 \rangle, \langle 9 \rangle, \langle 11 \rangle, \langle 12 \rangle, \langle 13 \rangle, \langle 14 \rangle\}\end{aligned}$$

Generátorem jsou všechna čísla nesoudělná s 15.

## 7. Multiplikativní grupy $\mathbb{Z}^\times$

### Multiplikativní cyklická grupa

$\mathbb{Z}_n^\times$  je cyklická tehdy a jen tehdy, když  $n = 2, 4, p^k, 2p^k$ , kde  $p$  je liché prvočíslo a  $k \in \mathbb{N}^+$ .

- Multiplikativní grupa modulo  $p$ , kde  $p$  je prvočíslo, je množina  $\{1, 2, \dots, p-1\}$  s operací násobení modulo  $p$ . Tuto grupu značíme  $\mathbb{Z}_p^\times$ .
  - Grupa  $\mathbb{Z}_p^\times$  je vždy cyklická.
  - Řád této grupy  $\mathbb{Z}_p^\times$  je  $p-1$  a má tedy  $\varphi(p-1)$  generátorů.
- Prvky multiplikativní grupy jsou nesoudělné s jejím modulem, řád multiplikativní grupy tedy získáme jako:

$$\#\mathbb{Z}_{MOD}^\times = \varphi(MOD).$$

### Příklad

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}_3^\times &= \{1, 2\} \\ \mathbb{Z}_7^\times &= \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\ (6 * 6)_{MOD 7} &= 1 \\ (6 * 5)_{MOD 7} &= 2 \\ \dots\end{aligned}$$

### Příklad II.

Najděte podgrupy následující multiplikativní grupy

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}_{22}^\times &= \{1, 3, 5, 7, 9, 13, 15, 17, 19, 21\} \ (G) \\ \#\mathbb{Z}_{22}^\times &= 10\end{aligned}$$

Tato grupa je cyklická, protože

$$\begin{aligned}22 &= 11 * 2 \left(= 2 * \mathbb{P}^1\right) \\ \varphi(10) &= 4\end{aligned}$$

Její podgrupy budou (triviální grupy vynecháme) řádů

$$10 = 2 * 5 \rightarrow \#2 \text{ a } \#5$$

Podgrupy nalezneme pomocí generátorů podgrupy (každý prvek grupy  $G$ ) postupným uzavíráním:

$$\begin{aligned}\langle 3 \rangle &= \{3\} \\ &= \{3, 3 * 3\} = \{3, 9\} \\ &= \{3, 9, (9 * 3)_{22}\} = \{3, 9, 5\} \\ &= \{3, 9, 5, 5 * 3\} = \{3, 9, 5, 15\} \\ &= \{3, 9, 5, 15, (15 * 3)_{22}\} = \{3, 9, 5, 15, \boxed{1}\}\end{aligned}$$

Vygenerovaná podgrupa je řádu 5, což je v pořádku.

Stejným způsobem pokračujeme pro všechny prvky z  $G$ . Zjistíme, že generátory podgrupy

$$\langle 7 \rangle, \langle 13 \rangle, \langle 17 \rangle \text{ a } \langle 19 \rangle$$

vygenerují celou grupu  $G$ , jsou tedy jejími generátory (jejich počet sedí s  $\varphi(10)$ ).

## 8. Eulerova funkce

Eulerova funkce  $\varphi(n)$ , kde  $n \geq 2$ , je definována jako počet kladných celých čísel, která jsou nižší než  $n$  a jsou s  $n$  nesoudělná<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}\varphi(1) &= 1; \varphi(2) = 1 \\ \varphi(p) &= p - 1, p \in \mathbb{P} \\ \varphi(p^k) &= (p - 1) * p^{k-1}, p \in \mathbb{P} \\ \varphi(n * m) &= \varphi(n) * \varphi(m), n, m \in \mathbb{N} \text{ a } n, m \text{ jsou nesoudělná}\end{aligned}$$

---

<sup>2</sup>Nesoudělná čísla jsou v matematice taková celá čísla, která mají pouze jednoho kladného společného dělitele – číslo 1.

## 9. Řešený příklad z midtermu

Grupa  $\mathbb{Z}_{26}^\times$  je cyklická. Pro jakou množinu  $A$  je následující výrok pravdivý: Prvek  $a$  je generátor grupy  $\mathbb{Z}_{26}^\times$  jestliže  $a^n \neq 1$  pro všechna  $n \in A$ .

- (A)  $A = \{2, 4, 7, 13\}$
- (B)  $A = \{4, 7\}$
- (C)  $A = \{4, 6\}$
- (D) Ani pro jednu z nabízených možností.
- (E)  $A = \{1, 2, 3, 4, 6\}$

**Poznámka k zadání:** Hledáme taková čísla, na která když umocníme generátor, výsledek se nebude rovnat 1.

---

Při řešení vycházíme z následujících dvou vět:

- Řád podgrupy dělí řád grupy.
- V cyklické grupě platí  $a^n = e$ , kde  $n$  je řád grupy a  $e$  její neutrální prvek.

Pokud je  $a$  generátor grupy (řečeno v zadání), musí dle předchozího platit, že  $a^1, a^2, \dots, a^{n-1}$  se **nerovnájí**  $e$ . Dále budeme vycházet z vlastnosti, že pokud prvek není generátorem grupy, je generátorem některé její podgrupy (viz sekce [Podgrupy](#)). Z čehož plyne, že  $a^h$ , kde  $h$  je řád podgrupy, by bylo 1.

Řády podgrup grupy  $\mathbb{Z}_{26}^\times$  mohou být  $\{2, 3, \mathbf{4}, \mathbf{6}\}$  ( $\varphi(26) = 12$ ).

Správná odpověď je tedy **C)  $A = \{4, 6\}$**  – jinými slovy jestliže  $a^4 \neq 1 \wedge a^6 \neq 1$ , pak  $a$  je generátorem (o obdobně pokud by  $a^4 = 1$  ( $1 = e$ , a 4 není řádem grupy)  $a$  by bylo generátorem nějaké podgrupy).

## 10. Základní věty

- V každém monoidu existuje právě jeden neutrální prvek. (Důkaz sporem)
  - Předpokládejme, že v monoidu existují dva různé neutrální prvky  $e_1$  a  $e_2$ . Musí platit  $e_1 = e_1 \circ e_2 = e_2$ , což je spor s předpokladem (takhle jednoduché to je).
- V grupě má každý prvek právě jeden inverzní prvek. (Důkaz sporem)
  - Předpokládejme, že v grupě existují pro prvek  $a$  dva různé inverzní prvky  $a_1^{-1}$  a  $a_2^{-1}$ . Pak musí platit  $a_1^{-1} = a_1^{-1} \circ e = a_1^{-1} \circ a \circ a_2^{-1} = e \circ a_2^{-1} = a_2^{-1}$ , což je spor s předpokladem.

## 11. Homomorfismus a izomorfismus

Tématem se zabývá 4. handout.

**Homomorfismus** Zobrazení, které zachovává operace. Buďte  $G = (M, \circ_G)$  a  $H = (N, \circ_H)$  dva grupoidy. Zobrazení  $\varphi : M \rightarrow N$  nazveme homomorfismem (homomorfním zobrazením)  $G$  do  $H$ , jestliže

$$\forall x, y \in M \text{ platí } \varphi(x \circ_G y) = \varphi(x) \circ_H \varphi(y).$$

**Slovy:** Jestliže na libovolné dva prvky v grupě  $G$  aplikujeme operaci grupy  $G$ , a pak výsledek zobrazíme do grupy  $H$ , **dostaneme vždy stejný výsledek**, jako kdybychom je (prvky grupy  $G$ ) nejdříve zobrazili do grupy  $H$  a **potom** aplikovali operaci grupy  $H$ .

- Pro homomorfní zobrazení vždy platí:
  - $e$  je neutrální prvek v  $G$ , potom  $\varphi(e)$  je neutrální prvek v  $H$ ;
  - zobrazení inverze je stejné jako inverze zobrazení;
  - pokud je  $G$  grupa, pak  $\varphi(G)$  je podgrupa v  $H$ ;
  - Neutrální prvek jedné grupy se homomorfismem zobrazí vždy na neutrální prvek té druhé.

**Izomorfismus** pokud je homomorfismus navíc *bijekcí*, tj.

$$a : G \rightarrow H \text{ a } b : H \rightarrow G, \quad a \circ b = id_H \text{ a } b \circ a = id_G.$$

- Bijekce je zobrazení, které je **prosté** (jeden obraz má nejvýše jeden vzor) a **na** (všechny obrazy mají svůj vzor).
- Oba **zachovávají strukturu danou binární operací** – je jedno, jestli nejdříve aplikujeme operaci a pak zobrazíme. nebo nejdříve zobrazíme a pak aplikujeme operaci.
- Pro definici homomorfismu vyžadujeme **pouze uzavřenost množiny** vůči binární operaci. Homomorfismus je proto definován na nejobecnějších grupoidech. Jednotlivé struktury od sebe dědí – definice homomorfismu se tedy přenáší i na grupy.
- Inverzní zobrazení k isomorfismu je také isomorfismus.
- Grupy, mezi kterými existuje izomorfismus, se nazývají **izomorfní**.
- **Počet různých izomorfismů** se rovná<sup>3</sup> faktoriálu z počtu generátorů (odpovídá počtu bijektivních zobrazení).
- Složení dvou (homo|izo)morfismů je (homo|izo)morfismus.
- Izomorfismus mezi dvěma cyklickými grupami zkonstruujeme tak, že na sebe zobrazíme jejich generátory a postupně si necháme „vygenerovat“ všechna ostatní zobrazení.

<sup>3</sup>Tato vlastnost byla odvozena z pozorování.

### 11.1. Důležité vlastnosti

- **Izomorfní grupy musí mít stejný řád.**
- Neutrální prvek jedné grupy se homomorfismem zobrazí vždy na neutrální prvek té druhé.
- Také inverze se zachovávají ve smyslu toho, že  $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$ .
- Je-li  $\varphi$  homomorfismus grupy  $G$  do  $H$ , pak  $\varphi(G)$  je podgrupa v  $H$ .
- **Izomorfní grupy jsou vlastně totožné, liší se pouze pojmenováním prvků.**

### 11.2. Věty

- Neutrální prvek jedné grupy se homomorfismem zobrazí vždy na neutrální prvek té druhé.
- Je-li  $\varphi$  homomorfismus grupy  $G$  do  $H$ , pak  $\varphi(G)$  je podgrupa v  $H$ .
- Libovolné dvě nekonečné cyklické grupy jsou izomorfní. Pro každé  $n \in \mathbb{N}$  jsou libovolné dvě cyklické grupy řádu  $n$  izomorfní.
- **Cayleyova věta:** Libovolná konečná grupa je izomorfní s nějakou grupou permutací.
- Obecně platí pro kartézský součin dvou grup  $H$  a  $G$  řádů  $n$  a  $m$  toto: kartézský součin je cyklická grupa právě když  $G$  a  $H$  jsou cyklické a  $n$  a  $m$  nesoudělné

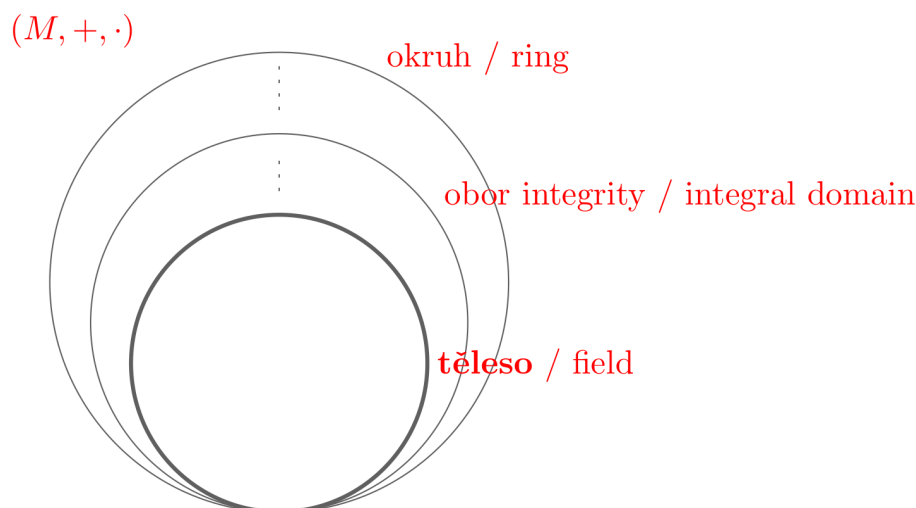
### 11.3. Skládání permutací

$$\left( \begin{array}{ccc} & \downarrow [3] & \\ 1 & 2 & \boxed{2} \\ & & 3 \end{array} \right) \circ \left( \begin{array}{ccc} \downarrow [1] & & \\ 1 & 2 & 3 \\ 3 \leftarrow [2] & & 1 \end{array} \right) = \left( \begin{array}{ccc} & & \\ \boxed{2} & 3 & 1 \end{array} \right)$$

## Část II.

## Tělesa a okruhy (algebra)

Tématem se zabývá 5. handout.



Obrázek 2: Hierarchie okruhů, oborů integrity a těles „TOBOK“.

## 12. Úvod

Doteď jsem se zabývali strukturami, které vzniknou přidáním jedné binární operace k neprázdné množině. Jako grupu jsme definovali takovou strukturu, kde má daná operace něco jako svou inverzi, což je analogie k tomu co známe z klasických množin čísel: odečítání je přičítání inverze podobně jako dělení je násobení inverzí. Ovšem abychom měli aritmetiku kompletní, potřebujeme stejně jako na (reálných) číslech jak sčítání s odečítáním, tak také násobení s dělením, abychom mohli definovat například už tak základní pojem jako je polynom.

Budeme se věnovat právě **strukturám se dvěma binárními operacemi**, zejména okruhům a tělesům, které jsou právě zobecněním reálných čísel s dobře definovaným sčítáním a násobením i operacemi k nim obrácenými.

[handout 5]

## 13. Okruh (Ring)

Okruh je druh množiny se dvěma binárními operacemi. Buďte  $M$  neprázdná množina a „+“ a „\*“ binární operace. Řekněme, že  $R = (M, +, *)$  je okruh, pokud platí:

- $(M, +)$  je **Abelovská grupa** (komutativita);
- $(M, *)$  je **pologrupa**<sup>4</sup>;
- Platí levý a pravý distributivní zákon:

$$(\forall a, b, c \in M) (a(b + c) = ab + ac \wedge (b + c)a = ba + ca)$$

- Je-li  $*$  komutativní, je  $R$  **komutativní okruh**;

+:  
Abelovská  
grupa;  
\*:  
komutativita.

<sup>4</sup>Dříve bylo v předmětu MPI definován okruh s komutativním grupoidem.

- $(M, +)$  se nazývá **aditivní grupa** okruhu  $R$ ;
- $(M, *)$  se nazývá **multiplikativní pologrupa** okruhu  $R$ ;
- neutrální prvek grupy  $(M, +)$  se nazývá **nulový prvek** a značí se  $0$ , inverzní prvek k  $a \in M$  pak značíme  $-a$ . Násobení nulovým prvkem dává opět nulový prvek.
- V okruhu můžeme definovat odečítání předpisem

$$a - b := a + (-b)$$

### 13.1. Příklady

- $(\mathbb{N}, +, *)$  není okruh, neb  $(\mathbb{N}, +)$  není grupa;
- množina celých čísel  $(\mathbb{Z}, +, *)$  je okruh a obor integrity;
- platí-li  $0 * 0 = 0$ , pak triviální okruh je  $(\{0\}, +, *)$ .

## 14. Obor integrity

Buď  $R = (M, +, *)$  okruh. Libovolné nenulové prvky  $a, b \in M$  takové, že

$$a * b = 0,$$

se nazývají **dělitelé nuly**.

Komutativní okruh bez dětelů nuly se nazývá **obor integrity**.

- Každý obor integrity je zároveň okruh.

### 14.1. Příklady

- $(\mathbb{Z}, +, *)$  je obor integrity;
- každý číselný okruh  $(M, +, *)$  kde  $M \subset \mathbb{C}$  a  $+$  a  $*$  jsou „klasické“, je obor integrity.

## 15. Těleso

Okruh  $T = (M, +, *)$  se **nazývá těleso**, jestliže  $(M \setminus \{0\}, *)$  je grupa a  $(M, +)$  je standardně Abelovská grupa.. Tuto grupu nazýváme multiplikativní grupou tělesa  $T$ . Nulu musíme vyjmout, protože k ní neexistuje inverzní prvek, tj. nelze dělit nulou:

$$0^{-1} = ??$$

Pro úplnost: Aditivní nulový prvek nemá multiplikativní inverzi.

### 15.1. Vlastnosti

- V každém tělese jsou definovány obvyklé aritmetické operace (sčítání, odčítání, násobení, dělení a odvozeně mocnění, odmocňování, logaritmování).
- Triviální těleso je  $(\{0, 1\}, +, *)$ , operace jsou XOR a AND (nebo normální operace modulo 2).
- Každé těleso je obor integrity.

*Nemá  
dělitele  
nuly.*

*Multiplikativní  
grupa bez 0.*



## 16. Konečné (Galoisovo) těleso

- Těleso, které má konečný počet prvků.
- Existují pouze tělesa řádu  $p^n$ , kde  $p$  je prvočíslo a  $n$  je přirozené číslo. Prvočíslo  $p$  se nazývá *charakteristika*. Navíc platí, že všechna tělesa řádu  $p^n$  jsou navzájem izomorfní.
- V tělesech je neutrálním prvkem číslo 1. V tělese  $GF(2^3)$  je např. neutrální číslo binární řetězec 001.

### 16.1. Zápis konečných (binárních) těles

- V binárním tělese lze každý prvek reprezentovat jako posloupnost 0 a 1.
- Sčítání je definováno jako sčítání po složkách modulo 2. Nulový prvek je prvek, který obsahuje samé 0, každý prvek je inverzí sama sebe, jde tedy o aditivní grupu.
- Násobení nelze po složkách, nebudou existovat inverze – násobení se zavede jako klasické násobení polynomů modulo nějaký zvolený ireducibilní polynom

$$\begin{aligned} 101 &= x^2 + 0x + 1 \\ 202 &= 2x^2 + 0x + 2 \end{aligned}$$

$$(-1)_3 = 2$$

(O kolik čísel se musíme posunout doleva, abychom získali 3.)

$$GF(M^\#) = (2^4)$$

$\#$  je řád:

$$\begin{aligned} \# &= 4 \rightarrow a, b, c, d \\ y &= ax^{\#-1} + bx^{\#-2} + \dots = ax^3 + bx^2 + cx + d \end{aligned}$$

$M$  je modulo, ve kterém počítáme:

$$M = 2 \rightarrow a, b, c, d = \{0, 1\}$$

#### 16.1.1. Aplikace

Advanced Encryption Standard (AES, symetrická bloková šifra). Kódovaná výměna textu: kódovaný text rozdělím na bloky o (např.) 8 bitech a zašifrujeme. Toto šifrování v AES je založeno na tom, že operace s  $n = 8$  bity lze chápat jako aritmetické operace v konečném tělese s  $2^n$  prvky pro  $n = 8$ . Tělesa s  $2^n$  prvky zveme binární tělesa a značíme  $GF(2^n)$  (jako Galois Fields).

## 17. Okruh polynomů nad okruhem/tělesem (Polynomiální okruh)

### 17.1. Definice

Polynomiální okruh je takový okruh, který je tvořen množinou polynomů s koeficienty z nějakého jiného okruhu.

Abychom mohli sčítat, odčítat a násobit polynomy ve tvaru  $\sum a_i x^i$ , potřebujeme pouze vědět jak sčítat, odčítat a násobit koeficienty. Obecně tedy můžeme vybudovat okruh polynomů podobný tomu, který známe z reálných resp. komplexních čísel, nad libovolným okruhem či tělesem.

Buď  $K$  okruh. Potom množina polynomů s koeficienty z tohoto okruhu spolu s operacemi sčítání a násobení definovanými jako:

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^n a_i x^i + \sum_{i=0}^n b_i x^i &= \sum_{i=0}^n (a_i + b_i) x^i \\ \left( \sum_{i=0}^n a_i x^i \right) * \left( \sum_{i=0}^m b_i x^i \right) &= \sum_{i=0}^{n+m} \left( \sum_{j+k=i} a_j b_k \right) x^i\end{aligned}$$

tvoří komutativní okruh polynomů nad okruhem  $K$ . Tento okruh značíme  $K[x]$ .

### 17.2. Výpočet nad tělesem s ireducibilním polynomem

#### 17.2.1. A – Dělení polynomu

V tělese

$$GF(2^4)$$

vyřešte rovnici

$$1111y = 0110 + 0101y,$$

kde se počítá modulo ireducibilní polynom

$$P(x) = x^4 + x^3 + 1.$$

---

$$\begin{aligned}1111y - 0101y &= 0101 \\ y(1111 - 0101) &= 0101\end{aligned}$$

Počítáme v modulo 2, proto:

$$\begin{aligned}1 + 1 &=_{MOD 2} 0 \\ - &=_{MOD 2} +\end{aligned}$$

*Okruh  
polynomů s  
koeficienty  
z jiného  
okruhu.*

$$\begin{aligned}
y1010 &= 0101 \\
y &= ax^3 + bx^2 + cx + d \\
(ax^3 + bx^2 + cx + d) * (x^3 + 0x^2 + x + 0 * 1) &= 0x^3 + x^2 + 0x + 1 \\
\dots &= \dots
\end{aligned}$$

Rovnici roznásobíme a vydělíme (běžné dělení polynomu polynomem) ireducibilním polynomem:

$$(ax^6 + bx^5 + ax^4 + \dots) \div (P(x) = x^4 + x^3 + 1) = 0$$

Ve zbytku po dělení odhadneme koeficienty  $a, b, c, d$ , aby rovnice vycházela. V našem případě:

$$\begin{aligned}
a &= 1 \\
b &= 0 \\
c &= 0 \\
d &= 0
\end{aligned}$$

Koeficienty dosadíme do předpisu  $y$ , čímž získáme finální výsledek:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d = x^3 = \mathbf{1000}$$

### 17.2.2. B – Rozšířeným Euklidovým algoritmem

Nejprve osamostatníme v původní rovnici  $y$ , zde nám nutně vyjde dělení (resp. násobení inverzí):

$$\begin{aligned}
y(1010) &= 0110 \\
y &= 0110 * (1010)^{-1}
\end{aligned}$$

Nyní vypočítáme inverzi  $1010 (= x^3 + x)$ :

	$\mathbf{x^4 + x^3 + 1}$	$\mathbf{x^3 + x}$	$\mathbf{x^3 + x}$	$\mathbf{x^4 + x^3 + 1}$
			0	1
	$\mathbf{x^3 + x}$		1	0
$\frac{x^4+x^3+1}{x^3+x} = x + 1$	$x^2 + x + 1$	$0 - [1 * (x + 1)] = \mathbf{x + 1}$	$1 - [0 * (x + 1)] = \mathbf{1}$	
$\frac{x^3+x}{x^2+x+1} = x + 1$	$x + 1$	$1 - (x + 1)^2 = \mathbf{x^2}$	$0 - 1 * (x + 1) = \mathbf{x + 1}$	
$\frac{x^2+x+1}{x+1} = x$	$\mathbf{1}$	$(x + 1) - (x * x^2) = \mathbf{\underline{\underline{x^3 + x + 1}}}$		

S inverzí dopočítáme  $x$ :

$$y = (x^2 + x) * (x^3 + x + 1) = x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x^2 + x$$

Výsledek vydělíme ireducibilním polynomem:

$$(x^5 + x^4 + x^3 + x) \div (x^4 + x^3 + 1) = x, \text{ zb. } \boxed{x^3 = 1000}$$

### 17.2.3. „Klasická“ metoda nalezení inverzního prvku

**Zadání:** „V tělese  $GF(3^2)$ , kde se násobí modulo polynom  $x^2 + 1$ , najděte inverzní prvek k prvku 12.“

- Budeme počítat v modulo 3.
- Polynom bude maximálně prvního stupně, tzn.  $ax + b$ .

$$12 = x + 2$$

Musíme nalézt takové koeficienty polynomu, aby platil výraz

$$(x + 2) * (ax + b) = 1 \text{ (pozn.: 1 je neutrální prvek).}$$

Výraz roznásobíme a vydělíme ireducibilním polynomem

$$(ax^2 + bx + 2ax + 2b) \div (x^2 + 1) = a, \text{ zbytek: } x(2a + b) + 2b - a.$$

Nyní budeme ve zbytku hledat taková  $a$  a  $b$ , aby se výraz rovnal původní 1, resp.  $0x + 1$ .

Řešením je tedy soustava dvou rovnic o dvou neznámých

$$x \left( \underbrace{2a + b}_{=0} \right) + \underbrace{2b - a}_1 = 0x + 1 \Rightarrow$$

$$2a + b = 0 \tag{1}$$

$$2b - a = 1 \tag{2}$$

Z první rovnice vyjádříme  $a$ , nezapomínejme, že počítáme v  $GF(3)$

$$2a = -b$$

$$|-b|_3 = 2b \Rightarrow$$

$$2a = 2b$$

$$a = b,$$

dosadíme  $a$  do druhé rovnice

$$2a - a = 1$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{1} \Rightarrow \mathbf{b} = \mathbf{1}.$$

Tyto koeficienty dosadíme do polynomu  $ax + b$

$$ax + b; a = b = 1.$$

**Výsledná inverze** k prvku 12 je

$$\underline{\underline{x + 1 (= 11)}}.$$

### 17.3. Ireducibilní polynom

- $K$  je okruh,  $K[x]$  je komutativní okruh polynomů nad okruhem  $K$ .

#### Ireducibilní polynom

Buď  $P(x) \in K[x]$  stupně alespoň 1. Řekněme, že  $P(x)$  je ireducibilní nad  $K$ , jestliže pro každé dva polynomy  $A(x)$  a  $B(x)$  z  $K[x]$  platí

$$A(x) * B(x) = P(x) \Rightarrow (\text{stupeň } A(x) = 0 \vee \text{stupeň } B(x) = 0).$$

- Slovy: Ireducibilní polynom je polynom, který nelze rozložit na součin jiných polynomů s nižším stupněm (vyjma polynomů stupně nula). Ireducibilní polynomy jsou **prvočísla mezi polynomy**.
- Polynom  $P(x)$  je ireducibilní iff nelze zapsat jako součin  $A(x) * B(x)$  dvou polynomů kladných stupňů

### 17.4. Ireducibilní polynomy v $\mathbb{Z}_2$

#### Tip

V  $\mathbb{Z}_2$  testujeme ireducibilitu pro polynomy, které končí  $\boxed{\dots + 1}$ , v  $\mathbb{Z}_3$  testujeme polynomy, které končí  $\boxed{\dots + 1}$  nebo  $\boxed{\dots + 2}$  atd. Toto pravidlo neplatí pro polynomy stupně 1.

#### Stupeň 0

$$\left. \begin{array}{ll} 0 & \text{NE} \\ 1 & \text{NE} \end{array} \right\} \text{Nevyhovují definici}$$

#### Stupeň 1

$$\left. \begin{array}{ll} x & \text{ANO} \\ x + 1 & \text{ANO} \end{array} \right\} \text{Všechny jejich násobky již nebudeme brát v úvahu}$$

#### Stupeň 2

$$\begin{array}{ll} x^2 & \text{NE (násobek } x) \\ x^2 + 1 & \text{NE} \\ x^2 + x & \text{NE (násobek } x) \\ x^2 + x + 1 & \text{ANO} \end{array}$$

#### Stupeň 3

$x^3$	NE
$x^3 + 1$	NE
$x^3 + x + 1$	ANO
$x^3 + x^2$	NE
$x^3 + x^2 + 1$	ANO
$x^3 + x^2 + x$	NE
$x^3 + x^2 + x + 1$	NE
$x^3 + x$	NE

#### Stupeň 4

$x^4 + x + 1$	ANO
$x^4 + x^3 + 1$	ANO
$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	ANO

#### 17.5. Rozšířený Euklidův algoritmus

		X	ireduc.
	ireduc.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
$\div$	zbytek	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	GCD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

### Příklad

Hledáme  $5 * x \equiv 1 \text{ MOD } 17$  tj. inverzi 5.

		<b>5</b>	<b>17</b>
	<b>17</b>	$0_A$	$1_C$
	<b>5</b>	$1_B$	$0_D$
$\frac{17}{5} = 3$	zb. 2	$-3_X$	$1_Y$
$\frac{5}{2} = 2$	zb. 1	<b>7</b>	$-2$

$$-3_X = 0_A - (3 * 1_B)$$

$$1_Y = 1_C - (3 * 0_D)$$

$$-2 = 0_D - (2 * 1_Y)$$

$$\mathbf{7} = 1_B - [2 * (-3_X)] \text{ (výsledná inverze)}$$

### Příklad „Petrův postup“

Hledáme  $5 * x \equiv 1 \text{ MOD } 17$  tj. inverzi 5.

$? \times$	17	0	1
$3 \times$	5	1	0
$2 \times$	2	-3	1
	1	<u>7</u>	-2
	0		

# Část III.

## Funkce více proměnných

Tématem se zabývá 8. handout.

### 18. Derivace

#### 18.1. Definice limity

Zde uvedeme jeden z nejdůležitějších pojmů spojených s funkcemi: limitu funkce. Než ukážeme formální definici, zkusíme získat představu, co je to limita. V zásadě je to pokus zodpovědět následující otázky: Je-li dána funkce  $f$  a nějaký bod  $a$ , co se stane s hodnotami  $f$ , jestliže do ní začneme dosazovat čísla blízka  $a$ ? Další možná otázka je tato: Jestliže zůstaneme blízko  $a$ , je možné aproximovat hodnoty  $f$  nějakým číslem s dostatečnou přesností?

Za prvé, bod  $a$  se nebere v úvahu, když sledujeme hodnoty při hledání limity; je to jen cílový bod pro  $x$ , ty se k  $a$  přibližují libovolně blízko, ale nikdy se mu přesně nerovnají. Je dokonce možné hledat limitu v  $a$ , aniž by tam funkce vůbec existovala.

Aby měla otázka na limitu v bodě  $a$  vůbec smysl, požadujeme, aby byla  $f$  definovaná na nějakém prstencovém okolí bodu  $a$ .

[\[math.feld.cvut.cz\]](http://math.feld.cvut.cz)

#### 18.2. Definice derivace

Derivace funkce  $f$  v bodě  $x_0$  je číslo, které odpovídá směrnici tečny k funkci  $f(x)$  v bodě o souřadnici  $x_0$ . Směrnice tečny je tangens úhlu, který daná tečna svírá s kladnou poloosou  $x$ .

Říkáme, že funkce  $f$  má v bodě  $x \in \mathbb{R}$  derivaci, je-li  $f$  definovaná v okolí bodu  $x$  a existuje-li limita

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \boxed{\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a}}$$

tuto limitu nazýváme derivace funkce  $f$  v bodě  $x$ .



### 18.3. Přehled základních derivací

#### Přehled základních derivací

$$\begin{aligned}C \frac{d}{dx} &= 0 \\x^n \frac{d}{dx} &= n * x^{n-1} \\\sin x \frac{d}{dx} &= \cos x \\\cos x \frac{d}{dx} &= -\sin x \\\tan x \frac{d}{dx} &= \frac{1}{\cos^2 x} \\\cot x \frac{d}{dx} &= -\frac{1}{\sin^2 x} \\e^x \frac{d}{dx} &= e^x \\\ln a \frac{d}{dx} &= \frac{1}{x} \\\log_a x \frac{d}{dx} &= \frac{1}{x \ln a} \\a^x \frac{d}{dx} &= a^x \ln a \\\arcsin x \frac{d}{dx} &= \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\\arccos x \frac{d}{dx} &= -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \\(u * v)' &= u' * v + u * v' \\\left(\frac{u}{v}\right)' &= \frac{u' * v - u * v'}{v^2}\end{aligned}$$

### 18.4. Parciální derivace v bodě $a$

Parciální derivace  $\partial^5$  funkce o více proměnných je její derivace vzhledem k jedné z těchto proměnných, přičemž s ostatními proměnnými se zachází jako s konstantami (v tomto kontextu je tedy opakem úplné derivace, kde mohou všechny proměnné měnit své hodnoty). Totální (úplná) derivace je derivace funkce více proměnných, která na rozdíl od parciální derivace zohledňuje závislosti mezi jednotlivými proměnnými.

Obecně, parciální derivaci funkce  $f(x_1, \dots, x_n)$  vzhledem k  $x_i$  v bodě  $a = (a_1, \dots, a_n) \in D_f$  tedy můžeme definovat jako:

---

<sup>5</sup> „ $\partial$ “ je „*partial*“ nebo také „*old-style Greek delta*“, značí parciální derivaci.

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(a_1, \dots, a_n) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a_1, \dots, a_i + h, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_n)}{h}$$

V předchozím výrazu jsou všechny proměnné kromě  $x_i$  pevně dané. Již samotná definice poskytuje návod, jak parciální derivace počítat. Parciální derivaci funkce podle pevně zvolené proměnné vypočítáme tak, že funkci derivujeme jen podle této proměnné, přičemž ostatní proměnné považujeme za konstanty.

## 18.5. Parciální derivace vyšších řádů

- 2. parciální derivace = parciální derivace parciálních derivací
- Značení:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} = \frac{\partial \frac{\partial f}{\partial x_i}}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial \frac{\partial f}{\partial x_i}}{\partial x_j} \quad (2)$$

1. Derivuj parciální derivaci podle  $x$  podle  $x$ ;
2. Derivuj parciální derivaci podle  $x$  podle  $y$ ;

## 19. Vyšetření průběhu funkce

### 19.1. Funkce jedné proměnné

- Určíme **definiční obor** funkce.
- **Průsečíky** s:
  - **osou**  $x$  získáme dosazením  $y = 0$  do  $f$
  - **osou**  $y$  získáme dosazením  $x = 0$  do  $f$ .
- *Body podezřelé z extrémů* získáme pomocí rovnice

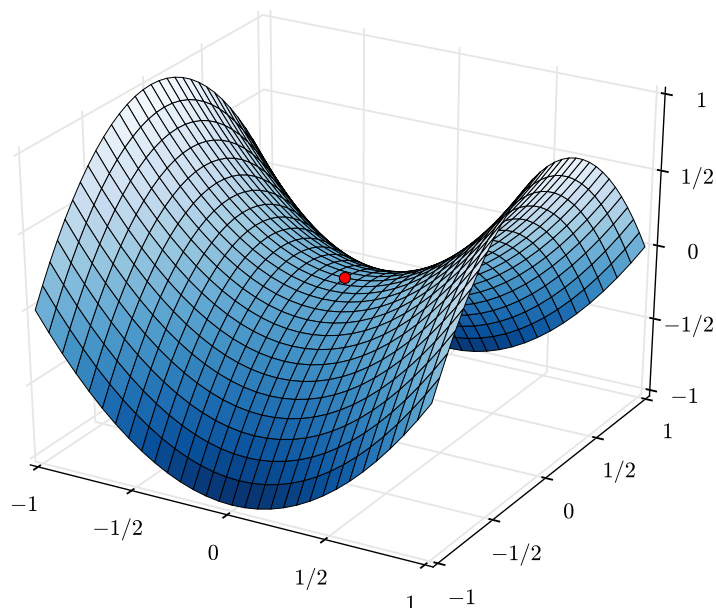
$$f'(x) = 0 \rightarrow x_1 = A, x_2 = B, \dots$$

- jejich  $y$  souřadnice získáme dosazením kořenů z předchozí rovnice do původní funkce  $f$ .
- Pro ověření, zda body podezřelé z extrémů jsou maximum nebo minimum, dosadíme do vztahu

$$f''(x \leftarrow A, x \leftarrow B, \dots).$$

- Pokud je tento výsledek **menší než nula** ( $< 0$ ), jedná se o **lokální maximum**,
- pokud je tento výsledek **větší než nula** ( $> 0$ ), jedná se o **lokální minimum**.

## 19.2. Funkce více proměnných



Obrázek 3: Sedlový bod.

Postup je obdobný jako při vyšetřování lokálních extrémů pro funkce jedné proměnné. Nalezneme kandidáty pomocí první derivace – tedy vyřešíme soustavu rovnic takovou, že gradient se rovná nule. Poté pomocí druhé derivace (Hessova matice) tyto extrémy posoudíme.

Vyšetřování extrémů pro  $f(x, y)$ :

1. Řešíme soustavu rovnic  $\nabla f(x, y) = \vec{0}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) &= 0\end{aligned}$$

a najdeme tak stacionární body<sup>6</sup>  $\vec{a}$ .

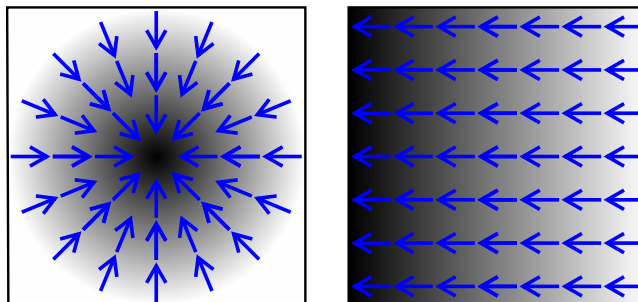
2. Pro každý stacionární bod najdeme odpovídající Hessovu matici

$$H = H(\vec{a})$$

V těchto bodech může být minimum, maximum nebo sedlový bod, který z nich to je se zjišťuje určením definitnosti Hessovy matice v těchto bodech extrémů.

## 20. Gradient

Vektor  
nejrychlejšího  
růstu.



Obrázek 4: Gradient dvou funkcí. Černě jsou označeny vyšší hodnoty funkce.

- Vektor značící směr nejrychlejšího růstu funkce  $f$ .
- **Gradient v bodě** je vektor nejrychlejšího růstu funkce  $f$  z tohoto bodu.
- Gradient skalárně<sup>7</sup> vynásobený vektorem je derivace funkce  $f$  v tomto bodě ve směru tohoto vektoru.

### Definice gradientu

Vektor

$$\nabla f(a) = \left( \frac{\partial}{\partial x_1}(a); \frac{\partial}{\partial x_2}(a); \dots; \frac{\partial}{\partial x_n}(a) \right)$$

se nazývá gradient funkce  $f$  v bodě  $a$ .

Pozn.:

- „ $\nabla$ “ je „nabla“, značí gradient

### 20.1. Gradient ve směru a v bodě

#### Norma (velikost) vektoru

$$\|\vec{a}\| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2}$$

#### Normalizace vektoru

$$\vec{n} = \frac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|} = \left( \frac{a_1}{\|\vec{a}\|}; \frac{a_2}{\|\vec{a}\|}; \dots; \frac{a_n}{\|\vec{a}\|} \right)$$

- Mějme funkci  $f(x, y)$ , směr  $\vec{s}$  a bod  $B[a, b]$ , tedy  $B \in \mathbb{R}^n$
- **Gradient v bodě:** Spočteme  $\nabla f$  v bodě  $B$ , tedy  $\nabla f(x \leftarrow a, y \leftarrow b)$ 
  - Další možný zápis gradientu v bodě:  $\frac{\partial f}{\partial x}(a, b) = \dots, \frac{\partial f}{\partial y}(a, b) = \dots,$

<sup>6</sup>Body podezřelé z extrémů.

<sup>7</sup>Skalární součin definujeme mezi dvěma vektory. Výsledkem skalárního součinu je reálné číslo.

- Výsledný gradient v bodě  $a$  ve směru je („ $*$ “ je skalární součin):

$$\nabla f(B) * \vec{n}.$$

- **Kritický bod** – Bod, ve kterém je gradient (všechny derivace) roven nulovému vektoru  $\nabla f = (0, 0, 0)$ .
  - Nalezneme vyřešením soustavy lineárních rovnic.
  - V těchto kritických bodech **může být** minimum, maximum nebo sedlový bod, který z nich to je se zjišťuje určením definitnosti Hessianovy matice v těchto bodech extrémů. Pro všechny lokální extrémy platí, že  $\nabla f(x) = 0$ , což je podmínka nutná, nikoliv postačující.

Dále nás může zajímat v **jakém směru či směrech funkce v daném bodě klesá či roste**. Gradient v bodě skalárně vynásobíme obecným vektorem  $(x, y)$ , a ptáme se, kdy je výsledek menší než nula (směrnice klesá) či větší než nula (směrnice roste).

## 21. Jacobiho matice

Jacobiho matice je matice parciálních derivací vektorové funkce  $f$ . Vektorová funkce  $f$  je zadána uspořádanou  $n$ -ticí reálných funkcí. Těmto funkcím budeme říkat složky vektorové funkce  $f$ .

Mějme funkci  $\vec{f} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , která jako parametr přijímá vektor  $x \in \mathbb{R}^n$  a vrací vektor  $f(x) \in \mathbb{R}^m$ . Jacobiho matice  $J$  funkce  $f$  je následující matice  $m \times n$

$$\text{Pro } f(x) = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix} \text{ platí } J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

Pokud je tato matice čtvercová (tedy  $m = n$ ), nazýváme její determinant Jacobiho determinant (také jacobíán). Jacobiho matice je zobecnění gradientu (a pro  $m = 1$  je rovna gradientu).

## 22. Hessova matice (Hessián)

Vyšetřování lokálních extrémů funkce více proměnných vede na úlohu rozhodnout o typu definitnosti Hessianovy matice.

Hessián je determinant Hessianovy matice, někdy se tak taky označuje sama matice. Hessova matice je matice parciálních derivací druhých řádů („parciální derivace parciálních derivací“).

- Hessovou maticí zjistíme, zda je kritický bod extrém a případně jaký (minimum, maximum nebo sedlový bod).
- Pokud máme **více bodů podezřelých z extrémů**, dosadíme je do Hessianovy matice, kterou následně vyšetříme.

Nechť máme funkci  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , potom její Hessova matice je:

$$\nabla^2 f(x_1, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{x podle x} & \text{x podle y} & \text{x podle z} \\ \text{y podle x} & \text{y podle y} & \text{y podle z} \\ \text{z podle x} & \text{z podle y} & \text{z podle z} \end{matrix} \end{bmatrix}$$

Platí, že pokud je Hessova matice nějak semidefinitivní, tak nemůžu o globálnosti nic prohlásit a prostě smůla.

## 23. Definitnost matic

Podle Tomáše Kalvody platí, že pokud je Hessova matice nějak semidefinitivní, tak nemůžu o globálnosti nic prohlásit a prostě smůla.

- Vlastnost regulárních<sup>8</sup> matic, která je definována jako

$$(v) * (A) * (v)^T \text{ např.: } \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} * (A) * \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

- Pokud je výsledek po vynásobení libovolným vektorem
  - vždy  $> 0$  je matice pozitivně definitní,
  - vždy  $< 0$  je matice negativně definitní.
- Pokud má výsledek po vynásobení různými vektory různá znaménka, je matice indefinitní.

- 
- Jestliže je matice **pozitivně definitní**, pak je v bodě **lokální ostré minimum**, pokud je semidefinitní, pak minimum není ostré
  - Jestliže je matice **negativně definitní**, pak je v bodě **lokální ostré maximum**, pokud je semidefinitní, pak maximum není ostré
  - Jestliže je matice indefinitní, pak je v bodě sedlový bod.

*Pozitivní  
minimum;  
negativní  
maximum.*

<sup>8</sup>Čtvercová matice, jejíž determinant je různý od nuly, tzn.  $\det(A) \neq 0$

## 24. Sylvestrovo kritérium

Sylvestrovou metodou **nelze** určit semidefinitnost. V případě, že nám tato věta (metoda) nedá odpověď na otázku definitnosti matice  $M$ , pak stále ještě matice  $M$  může být pozitivně či negativně semidefinitní, nebo indefinitní.

- Můžeme použít pouze pro *symetrické matice*.
- Spočítáme *rohové subdeterminanty*:

$$\nabla^2 f = \left( \underbrace{\begin{pmatrix} \boxed{M1} & \dots & \dots \\ \dots & M2 & \dots \\ \dots & \dots & M3 \end{pmatrix}}_{\text{Hesseova matice}} \right)$$

### Vyhodnocení výsledků

- Pokud  $\forall i : \det(M_i) > 0$  je matice  $M$  je **pozitivně definitní**.
- Pokud jsou všechny determinanty  $M_k$  nenulové a střídají znaménko a první determinant je záporný ( $- \rightarrow + \rightarrow - \rightarrow \dots$ ), je matice **negativně definitní**.
- Pokud má matice na diagonále **alespoň dva prvky**, kde je jeden kladný a druhý záporný, je matice **indefinitní**

**Pokud neplatí ani jedno, není možné touto metodou definitnost určit** (přesněji řečeno: Hesseova matice není pozitivně ani negativně definitní) a musíme použít jinou metodu.

### Determinant matice pomocí Sarussova pravidla

$$\det \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = (a_{11}a_{22}a_{33} + a_{21}a_{32}a_{13} + a_{12}a_{23}a_{31}) - (a_{13}a_{22}a_{31} + a_{12}a_{21}a_{33} + a_{23}a_{32}a_{11})$$

## 25. Kvadratická forma matice

$$\vec{v} = (x, y, z):$$

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix}}_{\text{Hesseova matice}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \dots$$

$$\begin{pmatrix} x(a+d+g) & y(b+e+h) & z(c+f+i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \dots$$

- Do výsledku dosazujeme libovolné vektory a zjišťujeme, zda je celý výraz kladný nebo záporný:
  - Je výraz vždy kladný  $\rightarrow$  Hesseova matice je **pozitivně definitní**  $\rightarrow$  bod je lokální minimum
  - Je výraz vždy záporný  $\rightarrow$  Hesseova matice je **negativně definitní**  $\rightarrow$  bod je lokální maximum
  - Je výraz kladný i záporný  $\rightarrow$  Hesseova matice je **indefinitní**  $\rightarrow$  bod je *sedlový bod*
  - Matice může být i „semidefinitní“ a to tehdy, když pro nenulový vektor je výsledek nulový

## 26. Tečná rovina

- Obecná rovnice roviny:

$$ax + by + cz + d = 0$$

**Rovnice tečné roviny ke grafu funkce  $f(x, y)$  v bodě  $[a, b]$**

$$\frac{\partial f}{\partial x}(a, b)(x - a) + \frac{\partial f}{\partial y}(a, b)(y - b) - z + f(a, b) = 0$$

Jedná se tedy o rovinu s normálovým vektorem

$$\vec{n} = \left( \frac{\partial f}{\partial x}(a, b), \frac{\partial f}{\partial y}(a, b), -1 \right).$$



# Část IV.

## Integrál funkce více proměnných

### 27. Základní pojmy

**Rozdělení intervalu.** Mějme  $a, b \in \mathbb{R}$ ,  $a < b$ , pak konečná množina  $\sigma = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  kde platí  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  se nazývá **rozdělení intervalu**, které je ekvidistantní.

**Ekvidistantní.** Rozdělení  $\sigma$  se nazývá ekvidistantní, pokud  $x_k - x_{k-1} = \frac{b-a}{n}$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Tedy rozdělení zachovává konstantní vzdálenost mezi prvky.

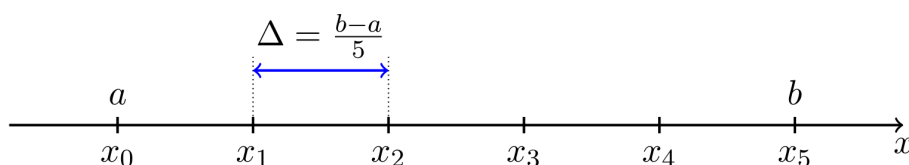
**Norma.** Číslo  $\nu(\sigma) = \max \{x_k - x_{k-1} | k = 1, \dots, n\}$  se nazývá norma  $\sigma$ . Norma dělení charakterizuje, jak je dělení jemné.

**Fun fact:** Symbol integrálu  $\int$  vznikl protažením písmene  $S$ , které označovalo sumu.

### 28. Riemannův integrál funkce jedné a více proměnných

- Hlavní myšlenka konstrukce je aproximace plochy pod křivkou pomocí obdélníků:
  - interval rozdělíme na malé kousky (tzv. rozdělení intervalu);
  - na těchto kouscích aproximujeme funkci  $f(x)$  vhodně zvolenými konstantami;
  - dostaneme takzvané stupňovité funkce;
  - obsah pod grafem stupňovité funkce je součet obdélníků, a tedy snadno spočitatelná veličina.
- Zjemňujeme rozdělení a tím získáváme přesnější a přesnější aproximace hledaného obsahu.
- Přesnou hodnotu získáme tak, že v limitě „pošleme“ šířku výše uvedených malých kousků k nule.

*Plocha pod křivkou.*



Obrázek 5: Rozdělení intervalu  $\sigma$

**Definice.** Necht funkce  $f$  je spojitá na intervalu  $\langle a, b \rangle$  a  $\sigma = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  je rozdělení tohoto intervalu. Označme

$$M_i = \sup_{x \in \langle x_{i-1}, x_i \rangle} f(x)$$
$$m_i = \inf_{x \in \langle x_{i-1}, x_i \rangle} f(x)$$

pro každé  $i = 1, 2, \dots, n$ . „SUP“ resp. „inf“ značí *SUPREMUM* tedy největší prvek resp. *infimum* tedy nejmenší prvek. Potom

$$S(\sigma) = \sum_{i=1}^n M_i \Delta_i \text{ a } s(\sigma) = \sum_{i=1}^n m_i \Delta_i$$

nazýváme horním, resp. dolním, součtem funkce  $f$  při rozdělení  $\sigma$ , kde  $\Delta_i = x_i - x_{i-1}$ . Dolní, resp. horní, součty představují obsah plochy tvořené obdélníky pod, resp. nad, grafem funkce.

Posloupnost rozdělení  $\sigma_n$  nazveme normální, pokud pro její normy platí

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \nu(\sigma_n) = 0.$$

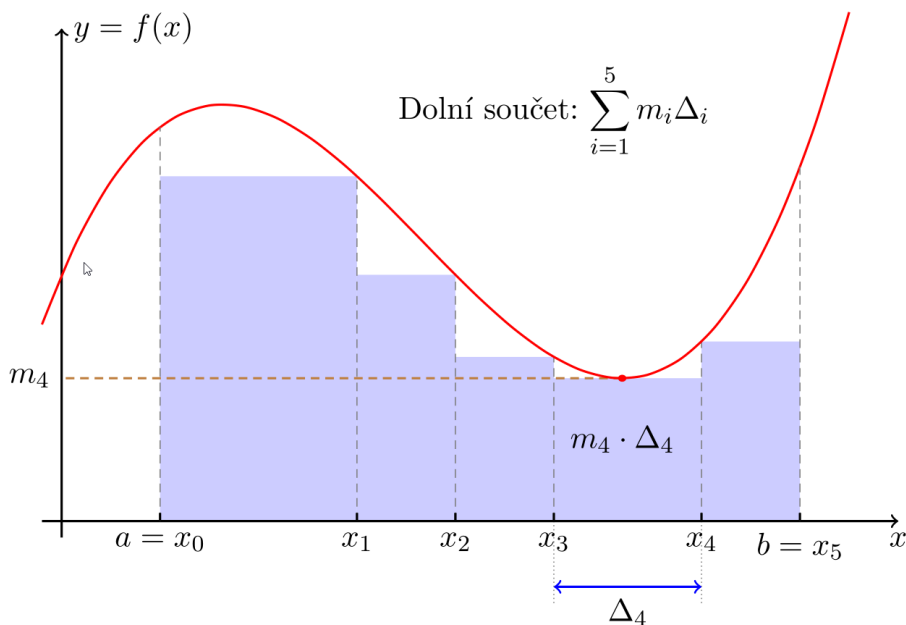
Nyní můžeme zformulovat velmi důležitou větu, umožňující definovat Riemannův integrál.

Nechť  $\sigma_n$  je normální posloupnost rozdělení intervalu  $\langle a, b \rangle$  a funkce  $f$  nechť je spojitá na intervalu  $\langle a, b \rangle$ . Potom limity

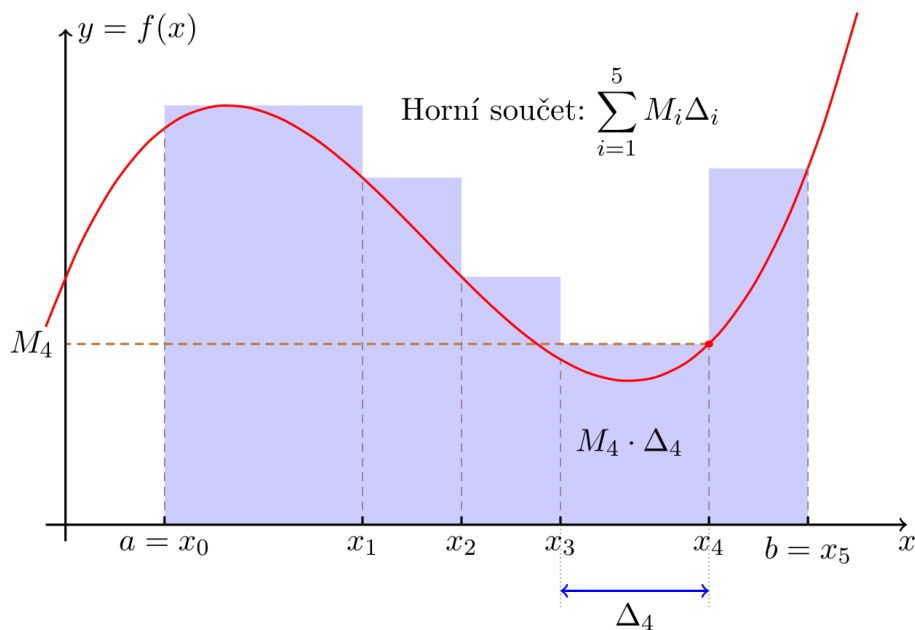
$$\lim_{n \rightarrow \infty} s(\sigma_n) \text{ a } \lim_{n \rightarrow \infty} S(\sigma_n)$$

existují, jsou si rovny a nezáleží na konkrétní volbě posloupnosti  $\sigma_n$ . Tuto společnou limitu nazýváme Riemannovým integrálem funkce  $f$  na intervalu  $\langle a, b \rangle$  a značíme symboly

$$\int_a^b f \text{ nebo } \int_a^b f(x) dx.$$



Obrázek 6: Dolní součet



Obrázek 7: Horní součet

## 28.1. Vlastnosti Riemannova integrálu

- Funkce  $f$  spojitá na  $\langle a, b \rangle$  je na  $\langle a, b \rangle$  integrovatelná.

**Aditivita integrálu.** Nechť  $f$  a  $g$  jsou spojitě funkce na intervalu  $\langle a, b \rangle$ . Potom pro Riemannův integrál funkce  $f + g$ , která je také automaticky spojitá na  $\langle a, b \rangle$ , platí

$$\int_a^b (f + g)(x) \, dx = \int_a^b f(x) \, dx + \int_a^b g(x) \, dx$$

**Multiplikativita integrálu.** Nechť  $f$  je spojitá na intervalu  $\langle a, b \rangle$  a  $c \in \mathbb{R}$  je konstanta. Potom pro Riemannův integrál funkce  $cf$  platí

$$\int_a^b (cf)(x) \, dx = c \int_a^b f(x) \, dx$$

## 29. Newtonův integrál

### 29.1. Primitivní funkce

Primitivní funkce k funkci  $f$  je taková funkce  $F$ , pro kterou platí, že

$$f = F'$$

. Hledání primitivní funkce je tedy něco jako inverzní proces k derivování.

## 29.2. Primitivní funkce elementárních funkcí

### Přehled tabulkových integrálů

$$\begin{aligned}\int 0 \, dx &= c \\ \int a \, dx &= ax + c \\ \int x^n \, dx &= \frac{x^{n+1}}{n+1} + c \text{ pro } x > 0, n \in \mathbb{R} \text{ a } n \neq -1 \\ \int \frac{1}{x} \, dx &= \ln |x| + c \text{ pro } x \neq 0 \\ \int e^x \, dx &= e^x + c \\ \int a^x \, dx &= \frac{a^x}{\ln(a)} + c \text{ pro } a > 0, \text{ a } a \neq 1 \\ \int \sin x \, dx &= -\cos x + c \\ \int \cos x \, dx &= \sin x + c\end{aligned}$$

- Integrace *per partes* (integrace po částech):

$$\int u \cdot v' = uv - \int u' \cdot v$$

- Substitute

$$\int_a^b f(x) \, dx = \int_{\Phi^{-1}(a)}^{\Phi^{-1}(b)} \Phi'(t) f(\Phi(t)) \, dt$$

## 29.3. Newtonova-Leibnizova formule

Newtonův integrál představuje definici určitého integrálu, která je založena na existenci primitivní funkce.

Platí, pokud je funkce  $f(x)$  spojitá na intervalu  $\langle a, b \rangle$  a funkce  $F(x)$  je k ní na intervalu  $\langle a, b \rangle$  primitivní.

$$\int_a^b f(x) \, dx = [F(x)]_a^b = F(b) - F(a)$$

Tento vztah bývá též označován jako Newton-Leibnizova formule, popř. se o něm také hovoří jako o základní větě integrálního počtu.

## 30. Dvojný integrál nad obdélníkovou oblastí

Následující věta nám říká, jak převést problém výpočtu dvojného integrálu na dva jednodimenzionální podproblémy. Dvojný integrál přes obdélníkovou oblast  $D$  definujeme

jako

$$\iint_D f(x, y) \, dx dy = \int_a^b \left( \int_c^d f(x, y) \, dy \right) dx \text{ nebo } \int_c^d \left( \int_a^b f(x, y) \, dx \right) dy$$

kde  $D = \langle a, b \rangle \times \langle c, d \rangle \subset D_f \subset \mathbb{R}^2$  a  $a < b$ ,  $c < d$  jsou reálná čísla.

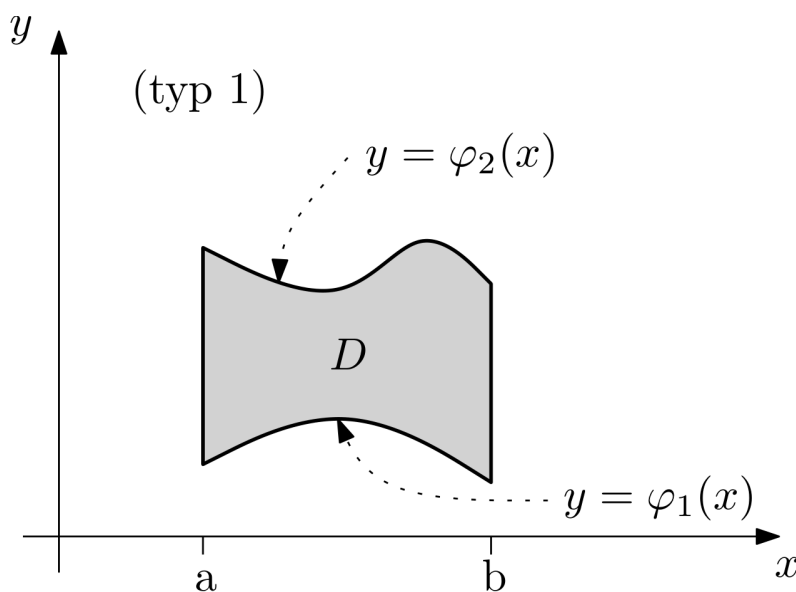
Výpočet dvojného integrálu tedy můžeme provést tak, že funkci nejdříve zintegrujeme vzhledem k jedné proměnné a druhou považujeme za konstantu. Výsledek této integrace (získaný pomocí Newtonovy formule) potom již závisí pouze na jedné proměnné, vzhledem které provedeme druhou integraci.

### 31. Dvojný integrál nad obecnou oblastí

Nyní si ukážeme, jak integrovat i přes oblasti, které jsou vymezené spojitými funkcemi. Uvažujeme dva typy oblastí

- **Typ 1:**  $x$  je z intervalu  $\langle a, b \rangle$  a  $y$  je omezené spojitými funkcemi  $\varphi_1(x)$  a  $\varphi_2(x)$ .

$$\iint_D f(x, y) \, dx dy = \int_a^b \left( \int_{\varphi_1(x)}^{\varphi_2(x)} f(x, y) \, dy \right) dx$$

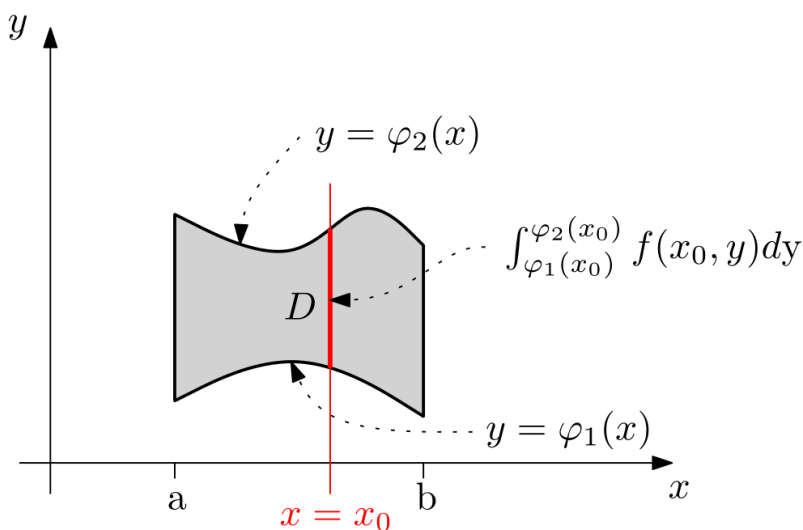


Obrázek 8: Obecná oblast typu 1

Myšlenka:

- Pro oblast typu 1 zafixujeme hodnotu  $x$  (na obrázku  $x = x_0$ ), nad vzniklým řezem oblasti  $D$  (na obrázku tučná červená čára) nám vznikne funkce  $f(x_0, y)$  jedné proměnné  $y$ .
- Plocha nad tímto řezem je rovna  $\int_{\varphi_1(x_0)}^{\varphi_2(x_0)} f(x_0, y) \, dy$

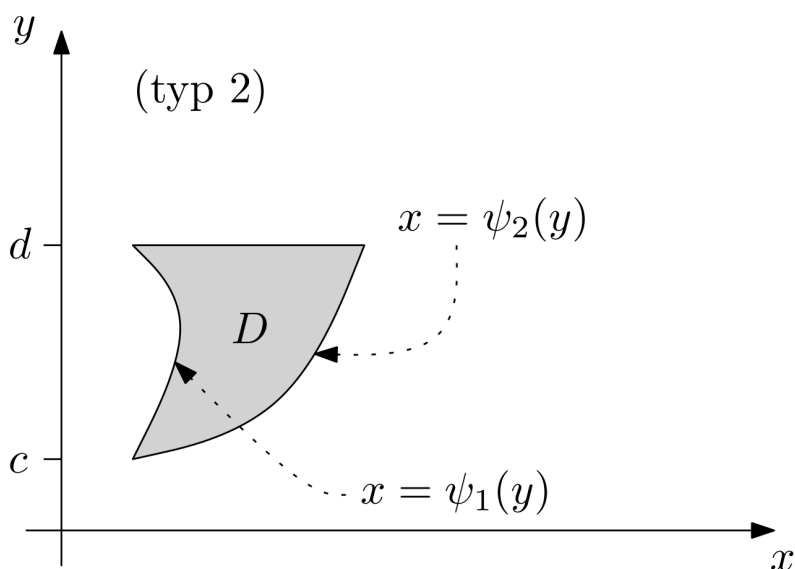
- Nyní „posčítáme“ takto získané jednorozměrné plochy přes všechna  $x$  od  $a$  do  $b$  a dostaneme  $\iint_D f(x, y) dx dy = \dots$



Obrázek 9: Obecná oblast typu 1

- **Typ 2:**  $y$  je z intervalu  $\langle c, d \rangle$  a  $x$  je omezené spojitými funkcemi  $\psi_1(y)$  a  $\psi_2(y)$ .

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_c^d \left( \int_{\psi_1(y)}^{\psi_2(y)} f(x, y) dx \right) dy$$



Obrázek 10: Obecná oblast typu 2

Poznámka k příkladu 2.2 ve cvičení 12: Vypočítejte  $\iint_D f(x+y)^2 dx dy$ . Zde budeme vyjadřovat  $y$  pomocí  $x$  (tj.  $f(y) = x \dots$  – funkce ohraničující „shora“ a „zdola“

trojúhelník), poté se budeme automaticky omezovat na ose  $x$ .

$$\int_{x_1}^{x_2} \left( \int_{y_1}^{y_2} (\dots) dy \right) dx$$

## 32. Trojný integrál a aplikace

Pomocí trojného integrálu můžeme spočítat několik užitečných čísel charakterizujících daný objem pod grafem funkce  $f$  nad oblastí  $D$ .

Konstrukce trojného integrálu je naprosto analogická konstrukci integrálu dvojného, pouze integrujeme funkci tří proměnných  $f(x, y, z)$

$$\iiint_D f(x, y, z) dx dy dz$$

Výpočet lze opět převést na tři výpočty jednorozměrného integrálu, existuje ovšem 3! možných pořadí integrování.

# Část V.

## Teorie grafů

### 33. Párování v grafu

#### 33.1. Bipartitní graf

Bipartitní graf je takový graf, jehož množinu vrcholů je možné rozdělit na dvě disjunktní množiny tak, že žádné dva vrcholy ze stejné množiny nejsou spojeny hranou.

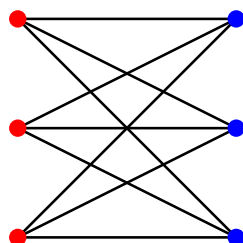
$$\begin{aligned} G &= (W, E) \\ W &= V \cup U \end{aligned}$$

$V$  a  $U$  jsou neprázdné disjunktní množiny a pro každou hranu platí, že jeden její vrchol je z  $V$  a druhý z  $W$ .

- **Úplný bipartitní graf** je, jestliže z každého vrcholu jedné množiny vedou hrany do všech vrcholů druhé množiny. Tedy platí

$$E = U \times W$$

nebo-li v grafu existují všechny hrany s touto vlastností.



Obrázek 11: Úplný bipartitní graf

- (Bipartitní) graf je **regulární**, jestliže všechny jeho vrcholy mají stejný stupeň. **Stupeň vrcholu** je počet hran, které z daného vrcholu vedou.

#### 33.2. Párování v grafu

##### Párování v grafu – definice

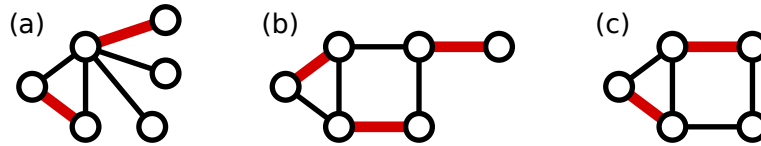
Buď  $G = (W, E)$  graf.  $M \subset E$  (podmnožina hran grafu  $G$ ) se nazývá párování v grafu  $G$ , jestliže žádné dvě hrany z  $M$  nemají společný vrchol.

Jinými slovy: Vrcholy grafů dáváme do párů. Pár může vzniknout jen tam, kde byla hrana. Přitom každý vrchol může být jen v jednom páru.

- **Maximální párování** – žádné jiné párování nemá více hran (nebo-li párování obsahuje nejvyšší možný počet hran). Graf může mít více maximálních párování.



- Párování je rovněž maximální, jestliže v grafu neexistuje  $M$ -zlepšující cesta.



Obrázek 12: Možná maximální párování v grafu, více hran už žádné jiné párování nemá

- **$M$ -saturovanost** vrcholu (též nasycenost vrcholu) – vrchol je již obsažen v nějakém párování.
- **Perfektní párování** (někdy též úplné) znamená, že jsou všechny vrcholy  $M$ -saturované (tj. všechny vrcholy grafu jsou součástí nějakého párování / páru). Perfektní párování je vždy maximální.
- **$M$ -střídající cesta** je taková cesta, jejíž vrcholy střídavě leží a neleží v párování.
- **$M$ -zlepšující cesta** je taková  $M$ -střídající cesta, jejíž koncové body nejsou saturované (přidáním hrany, která je spojuje, získáme opět párování, které bude mít však o jednu cestu více).

### 33.3. Stabilní párování

- Pár  $(z, p)$ ,  $z \in P$ ,  $p \in P$  je **nestabilní** v  $M$ , jestliže
  - $z$  a  $p$  nejsou spárováni v  $M$ ,
  - spárováním  $z$  a  $p$  by si polepšil jak zaměstnanec  $z$ , tak zaměstnavatel nabízející pozici  $p$ ,
- $M$  je stabilní, jestliže v  $M$  neexistuje nestabilní pár.
- V úplném bipartitním grafu **stabilní** párování vždy alespoň jedno existuje.

#### Dvořící algoritmus

Dokud není splněna ukončovací podmínka, probíhá každý den takto:

- **Ráno:** každá žena stojí na svém balkóně. Každý muž stojí pod balkónem ženy, která je nejvýše v jeho seznamu, a dvoří se jí. Muži s prázdným seznamem jsou doma.
- **Odpoledne:** každá žena, pod jejíž balkónem jsou alespoň dva muži, řekne tomu v seznamu nejvýše položenému, aby přišel zítra a ostatním, ať už nechodí.
- **Večer:** každý odehnáný muž si škrtne ze svého seznamu ženu, která ho dnes odehnala.

**Ukončovací podmínka:** každé ženě se dvoří nejvýše jeden muž.

- Párování, nalezená pomocí dvořícího algoritmu, jsou extrémní. neb pro ty na balkóně dopadnou nejhůře (mohou si vybírat jen z těch, kteří za nimi přijdou) a pro ty pod balkónem nejlépe (jdou za tím nejlepším partnerem).

# Část VI.

## Ostatní

### 34. Modulární aritmetika

---

**Algoritmus 1** Výpočet modula ze záporného čísla

---

```
1 int mod(int x, int m)
2 {
3     return (x%m + m)%m;
4 }
```

Ukázka použití:

```
1 >>> mod(-6, 5)
2 4
3 >>> mod(-2, 3)
4 1
5 >>> mod(-1, 3)
6 2
```

---

#### 34.1. Inverzní modulo

- Inverzi lze nalézt, jen když jsou základ a modulo nesoudělné.

##### Příklad

Nalezněte

$$\left|5^{-1}\right|_{11} = ?.$$

Musí tedy platit

$$(5 * x) \bmod 11 = 1.$$

Řešení

$$x = 9, \text{ protože } 5 * 9 = 45 \text{ a } (45)_{11} = 1.$$

### Příklad II.

V  $Z_{223}^\times$  najděte inverzi k číslu 63.

- Inverzi nalezneme pomocí Rozšířeného Euklidova algoritmu.

		223	63
223	1	0	
63	0	1	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
1	1	-46	-9

$$\text{inv.} = -46$$

Výsledek převedeme do kladného modula

$$\text{inv.} = -46 + 223 = \underline{177}.$$

## 34.2. Lineární kongruentní rovnice

Rovnice

$$a * x \equiv b \pmod{M}$$

má řešení, jestliže („<sup>9</sup> – dělí)

$$\text{GCD}(a, M) | b.$$

**Řešení:**

**Najdi  $\alpha \in \mathbb{Z}$  tak, že  $\alpha * a + \beta * M = \text{GCD}(a, M)$ , pak**

$$x \equiv \frac{\alpha * b}{\text{GCD}(a, M)} \pmod{\frac{M}{\text{GCD}(a, M)}}$$

## 34.3. Malá Fermatova věta

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$$

$$p \in \mathbb{P}, \text{GCD}(a, p) = 1$$

---

<sup>9</sup> $a|b$  znamená „ $a$  dělí  $b$ “ tzn.  $a < b$ . Např.  $2|16$ .

### Příklad

Spočítejte

$$381^{152} \bmod 13$$

$$\text{GCD}(381, 13) = 1, \mathbf{p} \in \mathbb{P}.$$

Modulo je prvočíslo, MFV tedy můžeme použít

$$\begin{aligned} 381^{12} &\equiv 1 \pmod{13} \\ 152 &= 12 * 12 + 8 \\ \left| 381^{12*12+8} \right|_{13} &= \left| \cancel{381^{12*12}} \right|_{13} * \left| 381^8 \right|_{13} \\ \left| 381 \right|_{13} &= 4 \\ 4^8 &= \left( (4^2)^2 \right)^2 \\ \left| 4^2 \right|_{13} &= 3 \\ \left| (4^2)^2 \right|_{13} &= \left| 81 \right|_{13} = \underline{\underline{3}}. \end{aligned}$$

### 34.4. Eulerova věta

- Zobecnění Malé Fermatovy věty

$$a^{\varphi(n)} \equiv 1 \bmod n$$

$$n \in \mathbb{N}, \text{GCD}(a, n) = 1$$

### Příklad

Spočítejte

$$3^{15} \bmod 28.$$

Modulo není prvočíslo, můžeme tedy použít Eulerovu větu

$$\text{GCD}(3, 28) = 1, p \notin \mathbb{P}$$

$$\begin{aligned}\varphi(28) &= \varphi(2^2 * 7) = (2-1) * 2 * \varphi(7) = 2 * 6 = \mathbf{12} \\ 3^{15} &= 3^{\mathbf{12}} * 3^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\left| 3^{\varphi(28)} \right|_{28} &\equiv 1 \pmod{28} \\ \left| 3^{12} * 3^3 \right|_{28} &\equiv 1 \pmod{28} \\ \left| 3^{\cancel{12}} * 3^3 \right|_{28} &\equiv 1 \pmod{28} \\ &\equiv 3^3 \equiv \underline{\underline{27}}.\end{aligned}$$

### 34.5. Čínská věta o zbytcích

Jsou dána přirozená čísla  $m_1, m_2, \dots, m_k$ , která jsou mezi sebou nesoudělná a  $m \geq 2$ . Pak pro libovolná celá čísla  $a_1, a_2, \dots, a_k$  existuje celé číslo  $x$  takové, že

$$\begin{aligned}x &\equiv a_1 \pmod{m_1} \\ x &\equiv a_2 \pmod{m_2} \\ &\vdots \\ x &\equiv a_k \pmod{m_k}.\end{aligned}$$

Tato soustava rovnic má řešení  $x$  a toto řešení je určeno jednoznačně v modulo

$$M = m_1 * m_2 * \dots * m_k.$$

### Příklad<sup>a</sup>

Řešte následující soustavu:

$$\begin{aligned}x &= 2 \pmod{3} \\x &= 1 \pmod{8} \\x &= 7 \pmod{13}\end{aligned}$$

Řešení bude ve tvaru:

$$x = 2 * q_1 + 1 * q_2 + 7 * q_3 \pmod{(3 * 8 * 13)}; 3 * 8 * 13 = 312$$

První koeficient:

$$\begin{aligned}s_1 &= \prod_{j \neq 1} m_j = 8 * 13 = 104 \\t_1 &= (s_1)^{-1} = (104)^{-1} = (2)^{-1} = 2 \pmod{3} \\q_1 &= s_1 * t_1 = 104 * 2 = 208 \pmod{312}\end{aligned}$$

Druhý koeficient:

$$\begin{aligned}s_2 &= \prod_{j \neq 2} m_j = 3 * 13 = 39 \\t_2 &= (s_2)^{-1} = (39)^{-1} = (7)^{-1} = 7 \pmod{8} \\q_2 &= s_2 * t_2 = 39 * 7 = 273 \pmod{312}\end{aligned}$$

Třetí koeficient:

$$\begin{aligned}s_3 &= \prod_{j \neq 3} m_j = 3 * 8 = 24 \\t_3 &= (s_3)^{-1} = (24)^{-1} = (11)^{-1} = 6 \pmod{13} \\q_3 &= s_3 * t_3 = 24 * 6 = 144 \pmod{312}\end{aligned}$$

Celkový výsledek:

$$x = 2 * 208 + 1 * 273 + 7 * 144 = 1697 = 137 \pmod{312}$$

Soustavu rovnic tedy řeší tato celá čísla:

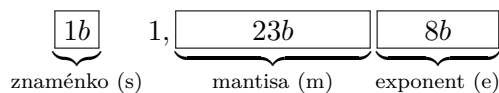
$$x = 137 + k * 312, k \in \mathbb{Z}$$

---

<sup>a</sup><http://voho.cz/wiki/matematika/cinska-veta-o-zbytcich/>

## 35. Numerická matematika a strojová čísla

### Struktura strojově zapsaného čísla



$$\text{resp.: } (-1)^z * (1, m)_2 * 2^{e-b}$$

- Obsahuje skrytou 1,
- V jednoduché přesnosti má exponent **rozsah**  $-128, +127$  a je zapsán v aditivním kódu.
  - Př.: „Číslo jsme normalizovali posunem o 9 míst doleva.“

$$\begin{aligned}
 e - 127 &= 9 \\
 e &= (136)_{10} = (10001000)_2
 \end{aligned}$$

- Do strojového formátu je možné zapsat pouze zlomky ve tvaru  $\frac{x}{2^y}$ , kde  $x$  a  $y$  jsou celá čísla
  - Všechna ostatní čísla, mají binární reprezentaci nekonečnou a periodickou

Při převodu dochází k chybám (vlivem zaokrouhlování nebo krácení). Nechť  $\alpha$  je přibližnou reprezentací čísla a  $a$  je skutečná hodnota čísla. **Absolutní chybu** spočítáme jako

$$|\alpha - a|$$

a **relativní chybu** pro  $a \neq 0$  jako

$$\frac{|\alpha - a|}{|a|}.$$

### „Pravítko“ na převod z a do binární soustavy

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1

### Zápis čísel ve tvaru $2^n$

Číslo ve tvaru

$$2^{-n}$$

má binární reprezentaci

$$0, \underbrace{000 \dots 000}_{(n-1) \times 0} 1.$$

Číslo ve tvaru

$$2^n$$

má binární reprezentaci

$$1 \underbrace{000 \dots 000}_{n \times 0}.$$

### Odčítání binárních čísel

$$\begin{aligned} 1 - 1 &= 0 \\ 1 - 0 &= 1 \\ 0 - 1 &= 1 \text{ (+ přenos)} \end{aligned}$$

Příklad

$$\begin{array}{r} 1 \ 0 \ 0 \\ - \ 1 \ 1 \\ \hline 0 \ 0 \ 1 \end{array}$$

Pokud převádíme zlomek, který je strojovým číslem, nemusíme používat hladový algoritmus, ale pomůžeme si rozkladem na mocniny 2. Např. chceme-li rozložit číslo

$$\frac{49}{512} = \frac{32 + 16 + 1}{2^9} = \underbrace{\frac{2^5}{2^9}}_{9-5=\boxed{4}} + \underbrace{\frac{2^4}{2^9}}_{9-4=\boxed{5}} + \underbrace{\frac{2^0}{2^9}}_{9-0=\boxed{9}}$$

Číslo bude ve tvaru 0, a následovat bude  $9 \times$  nula:

$$0, \underbrace{000 \ 1}_{[4][5]} \underbrace{1 \ 0001}_{[9]}.$$



### 35.1. IEEE-754

Přesnost	Délka mantisy („m“)	Délka exponentu („d“)	„b“
<b>binary32</b> (single)	23	8	127
<b>binary64</b> (double)	52	11	1023
<b>binary128</b> (quadruple)	112	15	16383

Tabulka 1: Počty cifer standardu IEEE-754

- Ve standardu jsou popsány i situace NaN, +Inf, -Inf.
- Pokud reprezentujeme čísla mimo rozsah, dochází k přetečení (overflow) resp. podtečení (underflow).
- **Absolutní chyba** je  $|\alpha - a|$ , kde  $\alpha$  je reprezentace čísla  $a$ .
- Pro  $a \neq 0$  se **relativní chyba** rovná  $\frac{|\alpha - a|}{|a|}$ .

### 35.2. Hladový algoritmus

- Slouží pro získání binární reprezentace čísel

### Příklad

$$\left(\frac{1}{13}\right)_{10} = (?)_2$$

Zvolíme  $l$ , tak aby platilo

$$\begin{aligned} 2^l &\leq \frac{1}{13} < 2^{l+1} \\ l &= -4 \\ \frac{1}{16} &\leq \frac{1}{13} < \frac{1}{8} \end{aligned}$$

Protože  $l = -4$ , bude výsledné číslo ve tvaru

$$0, \underbrace{000}_{\#4} \underbrace{?}_{\#5} \underbrace{?}_{\#6} \dots$$

Algoritmus:

$$l' = |l| = 4$$

*	(> 1 or < 1)	Výsledek	Do dalšího kroku	Výsledné číslo
$\frac{1}{13} * 2^4$	$\frac{16}{13}$	$> 1 \rightarrow \#4 = 1$	$\frac{16}{13} - 1 = \frac{3}{13}$	0,000 <b>1</b>
$\frac{3}{13} * 2$	$\frac{6}{13}$	$< 1 \rightarrow \#5 = 0$	$\times$	0,0001 <b>0</b>
$\frac{6}{13} * 2$	$\frac{12}{13}$	$< 1 \rightarrow \#6 = 0$	$\times$	0,00010 <b>0</b>
$\frac{12}{13} * 2$	$\frac{24}{13}$	$> 1 \rightarrow \#7 = 1$	$\frac{24}{13} - 1 = \frac{11}{13}$	0,000100 <b>1</b>
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
				0,00010011101100 <b>0</b>
$\frac{8}{13} * 2$	$res = \frac{16}{13} \rightarrow \perp$	$\times$	$\times$	$\times$

## 36. Numerické metody řešení soustav lineárních rovnic

### 36.1. Přímé metody – Gausova, hornerova

Máme vzorec, podle kterého vypočteme výsledek. Počítá s řešením nějakého problému v konečném počtu kroků – v teoretické absolutní přesnosti dává přesné řešení.

- Hornerova metoda – hodnota polynomu v bodě,
- Gaussova eliminace – má složitost  $\mathcal{O}(n^3)$ .

## 36.2. Iterační metody

Konstruuje **posloupnost přibližných řešení** (používáme předchozí výsledky) a hledáme celkové přibližné řešení matematického problému. Chceme-li řešit soustavu  $n$  lineárních rovnic, zapíšeme ji v maticovém tvaru

$$Ax = b,$$

kde  $A$  je nesingulární (singulární matice je čtvercová matice jejíž determinant je roven nule).

- $b$  je vstup úlohy a  $x$  je řešení.
- Norma je funkce, která každému nenulovému vektoru přiřazuje kladné reálné číslo (tzv. délku nebo velikost), nulový vektor jako jediný má délku 0.
- Musí být zaručeno, že celá iterační metoda bude konvergovat ke správnému výsledku.

Jednotlivé vektory posloupnosti (jednotlivá řešení) budeme počítat předpisem

$$Qx_k = (Q - A)x_{k-1} + b$$

pro všechna  $k > 0$ . Na začátku (kdy ještě nemáme předchozí výsledek) se volí  $x_k$  náhodně. Předpis pro řešený problém je

$$Ax = b.$$

- Vektor chyby je

$$e_k = x_k - x.$$

- Kdy ukončit? Iterační metodu ukončíme v kroku  $k$ , dosáhne-li  $x_k$  požadované přesnosti (ta je většinou dána v zadání).
  - V praxi mají algoritmy ještě jako parametr maximální počet iterací. Pokud po jeho překročení nenalezneme řešení s danou chybou, metoda selhala.

Normy:

- Eukleidovská norma,
- Maticová norma.

Metody (konkrétní volby  $Q$ ):

- Richardsonova metoda  $Q = I$  (jednotková matice),
- Jacobiho metoda

$$Q = D = \begin{pmatrix} a_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{2,2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix},$$

- superrelaxační metoda.

V iterační metodě počítáme chybu (odchylku) jako  $\|Ax_k - b\|$ .

Konkrétní zvolené  $Q$  závisí na zvolené metodě:

- Richardsonova metoda

$$Q = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

- Jacobiho metoda

$$Q = D = \begin{pmatrix} a_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{2,2} & \ddots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & a_{n,n} \end{pmatrix}$$

- super-relaxační metoda (SOR metoda)

$$Q = \frac{1}{\omega} D + L, \text{ kde } \omega \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

Značení matic:

- $L$  je dolní trojúhelníková matice s prvky matice  $A$ ,
- $D$  je diagonální matice s prvky matice  $A$  na diagonále,
- $I$  je jednotková matice.

## 37. Teorie čísel

### 37.1. Bézoutovy koeficienty

#### Bézoutovy koeficienty $\alpha$ a $\beta$

$$\alpha * N_1^+ + \beta * N_2^+ = GCD(N_1^+, N_2^+)$$

- Koeficienty je možné vypočítat pomocí [Rozšířený Euklidův algoritmus](#)
- GCD je možné vypočítat pomocí Euklidova algoritmu

#### Příklad „Petrův postup“

Hledáme  $\alpha * 12 + \beta * 42 = 6$

		$\alpha$	$\beta$
$?$	$\times$ 42	0	1
$3$	$\times$ 12	1	0
$2$	$\times$ 6	<u><u>-3</u></u>	<u><u>1</u></u>
	0		

$$-3 * 12 + 1 * 42 = 6.$$

### Příklad výpočtu GCD

$$GCD(27, 45) = ?$$

$$45 = 1 * 27 + 18$$

$$27 = 1 * 18 + 9$$

$$18 = 2 * \boxed{9} + 0 (\rightarrow \perp)$$

$$GCD(27, 45) = \underline{9}$$

Pokud  $gcd(m, n) = 1$ , pak říkáme, že  $m$  a  $n$  jsou nesoudělná.

## 38. Fuzzy matematika

Fuzzy matematika – matematika neurčitost nějakého prvku  $u$  z universa  $U$  k množině  $A$ .

- U klasických množin buď nějaký prvek do množiny patří nebo do ní nepatří. Toto je možné definovat jednoznačným výčtem prvků nebo definicí vlastností.
- V teorii fuzzy množin existuje *funkce příslušnosti*, která přiřazuje nějakému prvku  $u$  jeho stupeň příslušnosti k  $A$ .
- Využití v informatice: shlukování dat, hledání podobných obrázků.

### 38.1. Vzdálenost a podobnost

Vzdálenost  $\downarrow \sim$  podobnost  $\uparrow$

Vzdálenosti založené na normě vektoru:

- Minkovského

$$\|x\| = \left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \right\| = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_i|^p}, \quad p \in [1, \infty]$$

- Eukleidovská

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{x^T x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

- Manhatannská

$$\|x\| = \sum_{i=1}^n |x_i|, \quad p = \infty : \|x\| = \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$$

- Mahalanobisova vzdálenost – vzdálenost realizací  $x, y$  náhodných vektorů  $X, Y$  splňujících  $\text{var}X = \text{var}Y$ .

– - Jde o obecné měřítko vzdálenosti beroucí v úvahu korelaci mezi parametry

Další míry podobnosti náhodných veličin dle korelačních koeficientů:

- Pearsonův
- Spearmanův
- Kendallův

Podobnost binárních vektorů:

- Hammingova vzdálenost

## 38.2. Fuzzy množiny

- Fuzzy logika může operovat se všemi hodnotami z intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ , kterých je nekonečně mnoho.

### 38.2.1. Průnik (součin) fuzzy množin ( $T$ -normy)

Průnik je definován jako binární operace

$$T : \langle 0, 1 \rangle^2 \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$$

, která splňuje následující operace

- komutativita ,
- asociativita
- monotonie
- okrajová podmínka

Příklady norem

- Gödelova (drastická) norma

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x); \mu_B(x))$$

- Łukasiewiczova norma

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min(\mu_A(x) + \mu_B(x); 1)$$

- Součinná norma

$$\mu_{A \cup B}(x) = (\mu_A(x) + \mu_B(x); 1) - (\mu_A(x) * \mu_B(x); 1)$$

### 38.2.2. De Morganovy zákony a $T$ -konormy (součet – sjednocení)

- Komutativita

$$\perp(a, b) = \perp(b, a)$$

- Monotonie

$$\perp(a, b) \leq \perp(c, d) \text{ když } a \leq c \text{ a } b \leq d$$

- Asociativita

$$\perp(a, \perp(b, c)) = \perp(\perp(a, b), c)$$

- Identický element

$$\perp(a, 0) = a$$

### 38.3. Kopule

- Kopule je pojítka mezi fuzzy matikou a pravděpodobností.
- Kopule se hodí v pravděpodobnosti, kde ukazují závislost mezi dvěma náhodnými veličinami.

### 38.4. Defuzzifikace

- Defuzzifikace - zobrazení fuzzy množiny do jejího univerza.
- K čemu to je - mám přístroj řízený fuzzy množinou, ale abych ho nastavil, potřebuju znát jednu konkrétní hodnotu.

## 39. Optimalizace

### 39.1. Druhy optimalizačních úloh

- **Diskrétní** (==**kombinatorické**) – proměnné z konečné, často velmi velké, množiny. Např. požadavek, proměnné  $x_i$  celá čísla či  $x_i \in \{0,1\} \rightarrow$  integer programming problems.
- **Spojité** – proměnné reálná čísla či prvky z nespočetných množin. Jednodušší řešení - lze použít spojitost a hladkost funkce, napoví hodně o chování funkce v okolí daného bodu.

Algoritmy mohou být:

- Deterministické
- Stochastické – každý běh jiný