

Matematika pro informatiku

Souhrn látky

leden 2014

Obsah

1	Hierarchie množin s jednou binární operací	3
1.1	Základní pojmy	4
2	Podgrupy	4
3	Cyklické grupy a generátory	5
3.1	Aditivní grupy \mathbb{Z}^+	5
3.2	Multiplikativní grupy \mathbb{Z}^\times	6
3.3	Eulerova funkce	7
3.4	Řešený příklad z midtermu	8
4	Homomorfismus a izomorfismus	8
4.1	Důležité vlastnosti	9
4.2	Věty	9
5	Okruhy a tělesa	9
5.1	Okruh	9
5.2	Obor integrity	10
5.3	Těleso	10
5.4	Ireducibilní polynom	10
5.4.1	Ireducibilní polynomy v \mathbb{Z}_2	10
5.5	Rozšířený Euklidův algoritmus	11
5.6	Zápis těles	11
5.7	Výpočet nad tělesem s ireducibilním polynomem	12
5.7.1	A – Dělení polynomu	12
5.7.2	B – Rozšířeným Euklidovým algoritmem	13
5.7.3	„Klasická“ metoda nalezení inverzního prvku	13
6	Teorie čísel	14
6.1	Bézoutovy koeficienty	14
7	Modulární aritmetika	15
7.1	Inverzní modulo	15
7.2	Lineární kongruentní rovnice	16
7.3	Malá Fermatova věta	16
7.4	Eulerova věta	17
7.5	Čínská věta o zbytcích	18

8	Numerická matematika a strojová čísla	20
8.1	Hladový algoritmus	21
9	Stabilní párování	22
10	Vyšetření průběhu funkce	23
11	Derivace a parciální derivace	24
11.1	Definice	24
11.2	Přehled základních derivací	25
11.3	Gradient	25
11.4	Jacobiho matice	26
11.5	Parciální derivace vyšších řádů	26
11.6	Derivace ve směru v bodě	26
12	Funkce více proměnných	27
12.1	Hessova matice	27
12.2	Definitnost	27
12.2.1	Sylvestrovo kritérium	28
12.2.2	Kvadratická forma matice	28
12.3	Tečná rovina	29
13	Integrály	29
13.1	Tabulkové integrály	29
13.2	Newtonova formule	29
13.3	Integrály přes obdélníkovou oblast	30
13.4	Integrály přes obecnou oblast	30
14	Fuzzy matematika	30
14.1	Fuzzy množiny	30
14.1.1	T -normy	30
14.1.2	De Morganovy zákony a T -konormy	30

1 Hierarchie množin s jednou binární operací

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

$$(M, \circ) \\ M \circ M \rightarrow M$$

Grupoid M je uzavřená vůči operaci \circ .

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

Pologrupa Operace je nad M asociativní.

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

Monoid Existuje právě jeden¹ *neutrální prvek*.

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

Grupa Všechny prvky mají právě² jeden *inverzní prvek*.

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

Abelovská grupa Operace \circ je komutativní.

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

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

Cayleyho tabulka

Pokud má množina M z dvojice (M, \circ) konečný počet prvků, lze její strukturu (danou operací \circ) kompletně zachytit v tzv. *Cayleyho tabulce*.

- **Neutrální prvek** e se v Cayleyho tabulce pozná tak, že „jeho“ řádek i sloupec je stejný, jako první řádek a sloupec tabulky.
- **Inverzní prvek** k prvku najdeme, tak že v jeho sloupci a řádku nalezneme neutrální prvek e .
- **Uzavřenost** poznáme tak, že všechny buňky tabulky obsahují jen prvky z M .
- **Asociativitu** operace z tabulky poznáme těžko.

Cayleyho tabulka každé grupy tvoří *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 .

¹Přednáška 3 – handout, věta 11.

²Přednáška 3 – handout, věta 12.

Příklad Cayleyho tabulky

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

$+_4$	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

1.1 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.

2 Podgrupy

- \mathbb{Z} jsou celá čísla $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$, \mathbb{N} jsou přirozená čísla $\{1, 2, 3\}$, \mathbb{N}^0 jsou přirozená čísla včetně nuly.
- **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: $G = (M, \circ)$.

Langrangeova 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.

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

$$\begin{aligned}\langle 7 \rangle = \langle 13 \rangle &= \{1, 4, 7, 13\}, \{1, 2, 4, 8\} \\ \langle 2 \rangle = \langle 3 \rangle &= \{1, 14\}, \{1, 11\}\end{aligned}$$

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

3 Cyklické grupy a generátory

- V cyklické grupě $G = (M, \circ)$ řádu n platí pro všechny prvky $a \in M$, že $a^n = e$, kde e je neutrální prvek.
- Neutrální prvek \neq generátor.
- Grupa prvočíselného řádu (počet prvků je prvočíslo) je cyklická.
- Libovolná podgrupa cyklické grupy je opět cyklická grupa.
- Je-li G **cyklická multiplikativní** 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. $\gcd(k, n) = 1$).
- V cyklické grupě řádu n je počet generátorů roven $\varphi(n)$.

Příklad – základní ukázka grupy

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

3.1 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.

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.

3.2 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, platí tedy, že

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

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

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

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 $\varphi(10)$).

3.3 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.

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

3.4 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 **nerovnají** 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).

4 Homomorfismus a izomorfismus

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

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

Izomorfismus pokud je homomorfismus navíc *bijekcí*, tj.

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

- Oba zachovávají strukturu danou binární operací.
- Pro definici vyžadujeme pouze uzavřenost.
- Inverzní zobrazení k izomorfnímu zobrazení je izomorfní zobrazení.

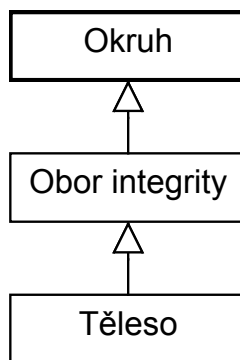
4.1 Důležité vlastnosti

- Izomorfní grupy musí mít stejný řád.
- Neutrální prvek jedné grupy se homomorfizmem zobrazí vždy na neutrální prvek té druhé.
- Také inverze se zachovávají ve smyslu toho, že $\varphi(x^{-1}) = \varphi(x)^{-1}$.
- Je-li φ homomorfismus grupy G do H , pak $\varphi(G)$ je podgrupa v H .
- Izomorfní grupy jsou totožné, mají jen jinak pojmenované prvky.

4.2 Věty

- Neutrální prvek jedné grupy se homomorfismem zobrazí vždy na neutrální prvek té druhé.
- Je-li φ 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

5 Okruhy a tělesa



Obrázek 1: Hierarchie okruhů, oborů integrity a těles

5.1 Okruh

Buďte M neprázdná množina a $+$ a $*$ binární operace. Řekněme, že $R = (M, +, *)$ je okruh, pokud platí:

- $(M, +)$ je Abelovská grupa (komutativita)
- $(M, *)$ je grupoid (uzavřené)
- Platí levý a pravý distributivní zákon:

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

5.2 Obor integrity

- Každý obor integrity je zároveň okruh.

5.3 Těleso

Okruh $T = (M, +, *)$ se nazývá těleso, jestliže $(M \setminus \{0\}, *)$ je grupa. Tuto grupu nazýváme multiplikativní grupou tělesa T . Nulu musíme vyjmout, protože nemá inverzi:

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

- Existují pouze tělesa řádu p^n , kde p je prvočíslo a n je přirozené číslo. Prvočíslo p se nazývá *charakteristika*.

5.4 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

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

- Ireducibilní polynomy jsou prvočísla mezi polynomy.

5.4.1 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

0	NE	} Nevyhovují definici
1	NE	

Stupeň 1

x	ANO	} Všechny jejich násobky již nebudeme brát v úvahu
$x + 1$	ANO	

Stupeň 2

x^2	NE (násobek x)
$x^2 + 1$	NE
$x^2 + x$	NE (násobek x)
$x^2 + x + 1$	ANO

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

5.5 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"/>	<i>GCD</i>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Příklad

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

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

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

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

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

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

5.6 Zápis těles

$$101 = x^2 + 0x + 1$$

$$202 = 2x^2 + 0x + 2$$

$$(-1)_3 = 2$$

(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:

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

5.7 Výpočet nad tělesem s ireducibilním polynomem

5.7.1 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:

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

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

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:

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

5.7.2 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 $1010 (= x^3 + x)$:

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

S inverzí dopočítáme x :

$$y = (x^2 + x) * (x^3 + x + 1) = x^5 + x^4 + x^3 + \mathbf{x^2} + \mathbf{x^2} + x$$

Výsledek vydělíme ireducibilním polynomem:

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

5.7.3 „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. $ax + b$.

$$12 = \mathbf{x + 2}$$

Musíme nalézt takové koeficienty polynomu, aby platil výraz

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

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 $\mathbf{1}$, 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 $GF(3)$

$$\begin{aligned} 2a &= -b \\ |-b|_3 &= 2b \Rightarrow \\ 2a &= 2b \\ a &= b, \end{aligned}$$

dosadíme a do druhé rovnice

$$\begin{aligned} 2a - a &= 1 \\ \mathbf{a} &= \mathbf{1} \Rightarrow \mathbf{b} = \mathbf{1}. \end{aligned}$$

Tyto koeficienty dosadíme do polynomu $ax + b$

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

Výsledná inverze k prvku 12 je

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

6 Teorie čísel

6.1 Bézoutovy koeficienty

Bézoutovy koeficienty α a β

$$\alpha * \mathbb{N}_1^+ + \beta * \mathbb{N}_2^+ = GCD(\mathbb{N}_1^+, \mathbb{N}_2^+)$$

- Koeficienty je možné vypočítat pomocí Rozšířený Euklidův algoritmus
- GCD je možné vypočítat pomocí Euklidova algoritmu

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.

7 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
```

7.1 Inverzní modulo

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

Příklad

Nalezněte

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

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.

$$\begin{array}{c|ccc}
 & & \mathbf{223} & \mathbf{63} \\
 & \mathbf{223} & 1 & 0 \\
 & \mathbf{63} & 0 & 1 \\
 \hline
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 1 & 1 & \boxed{-46} & -9
 \end{array}$$

$$inv. = -46$$

Výsledek převedeme do kladného modula

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

7.2 Lineární kongruentní rovnice

Rovnice

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

má řešení, jestliže („|“ – dělí)

$$GCD(a, M) | b.$$

Řešení:

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

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

7.3 Malá Fermatova věta

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

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

Příklad

Spočítejte

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

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

Modulo je prvočíslo, MFV tedy můžeme použít

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

7.4 Eulerova věta

- Zobecnění Malé Fermatovy věty

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

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

Příklad

Spočítejte

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

Modulo není prvočíslo, můžeme tedy použít Eulerovu větu

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

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

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

7.5 Čínská věta o zbytcích

Jsou dána přirozená čísla m_1, m_2, \dots, m_k po dvou nesoudělná. 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^a

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:

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

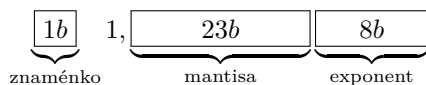
Soustavu rovnic tedy řeší tato celá čísla:

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

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

8 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 $-127, +127$
 - 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

„Pravítko“ na převod z a do binární soustavy

□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
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

$$1 - 1 = 0$$

$$1 - 0 = 1$$

$$0 - 1 = 1 \text{ (+ přenos)}$$

Příklad

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

8.1 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

$$0,\underbrace{000}_{\#4} \underbrace{?}_{\#5} \underbrace{?}_{\#6} \underbrace{?}_{\#7} \dots$$

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 1
$\frac{3}{13} * 2$	$\frac{6}{13}$	$< 1 \rightarrow \#5 = 0$	\times	0,0001 0
$\frac{6}{13} * 2$	$\frac{12}{13}$	$< 1 \rightarrow \#6 = 0$	\times	0,00010 0
$\frac{12}{13} * 2$	$\frac{24}{13}$	$> 1 \rightarrow \#7 = 1$	$\frac{24}{13} - 1 = \frac{11}{13}$	0,000100 1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\frac{8}{13} * 2$	$res = \frac{16}{13} \rightarrow \perp$	\times	\times	0,00010011101100 0
				\times

9 Stabilní párování

- Pár (z, p) , $z \in P$, $p \in P$ je **nestabilní** v M , jestliže
 - z a p nejsou spárování 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.
- **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 škrtně 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).

10 Vyšetření průběhu funkce

- 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**.

11 Derivace a parciální derivace

11.1 Definice

Definice parciální derivace v bodě a

$$a = (a_1, \dots, a_k) \in D_f$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = \lim_{x_1 \rightarrow a_1} \frac{f(x_1, a_2, \dots, a_k) - f(a)}{x_1 - a_1}$$

a podobně pro x_2, \dots, x_k .

Pozn.:

- „ ∂ “ je „*partial*“ nebo také „*old-style Greek delta*“, značí parciální derivaci

11.2 Přehled základních derivací

Přehled základních derivací

$$C \frac{d}{dx} = 0$$

$$x^n \frac{d}{dx} = n * x^{n-1}$$

$$\sin x \frac{d}{dx} = \cos x$$

$$\cos x \frac{d}{dx} = -\sin x$$

$$\tan x \frac{d}{dx} = \frac{1}{\cos^2 x}$$

$$\cot x \frac{d}{dx} = -\frac{1}{\sin^2 x}$$

$$e^x \frac{d}{dx} = e^x$$

$$\ln a \frac{d}{dx} = \frac{1}{x}$$

$$\log_a x \frac{d}{dx} = \frac{1}{x \ln a}$$

$$a^x \frac{d}{dx} = a^x \ln a$$

$$\arcsin x \frac{d}{dx} = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$\arccos x \frac{d}{dx} = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$(u * v)' = u' * v + u * v'$$

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u' * v - u * v'}{v^2}$$

11.3 Gradient

- Vektor značící směr nejrychlejšího růstu funkce f .
- Gradient v bodě je vektor nejrychlejšího růstu funkce f z tohoto bodu.
- Gradient skalárně vynásobený vektorem je derivace funkce f v tomto bodě ve směru tohoto vektoru.

Definice gradientu

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

Pozn.:

- „ ∇ “ je „*nabla*“, značí gradient

11.4 Jacobiho matice

- Matice parciálních derivací
- Determinant Jacobiho matice se nazývá *jakobián*

$$J_f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

11.5 Parciální derivace vyšších řádů

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \quad [= \text{derivuj parciální derivaci podle } x \text{ podle } x] \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \quad [= \text{derivuj parciální derivaci podle } x \text{ podle } y] \end{aligned}$$

11.6 Derivace ve směru v bodě**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 $B[a, b]$
- **Derivace v bodě:** Spočteme ∇f v bodě B , tedy $\nabla f(x \leftarrow a, y \leftarrow b)$
 - Další možný zápis derivace v bodě: $\frac{\partial f}{\partial x}(a, b) = \dots, \frac{\partial f}{\partial y}(a, b) = \dots,$
- Výsledná derivace ve směru v bodě je („ $*$ “ je skalární součin):

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

12 Funkce více proměnných

- **Kritický bod** – Bod, ve kterém je gradient (všechny derivace) roven nulovému vektoru $\nabla f = (0, 0, 0)$.

– Nalezneme vyřešením soustavy lineárních rovnic.

- Body grafu funkce $f(x, y) = z$ mají souřadnice

$$(x, y, f(x, y)).$$

- Eukleidovská vzdálenost bodů je

$$|AB| = \sqrt{(A - B)^2}$$

12.1 Hessova matice

- Hesseovu matici zjistíme, zda je kritický bod extrém a případně jaký.

Definice Hessovy matice

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

- *Hessián* je zkrácené pojmenování pro Hessovu matici.

12.2 Definitnost

- Vlastnost regulárních³ 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.

³Čtvercová matice, jejíž determinant je různý od nuly, tzn. $\det(A) \neq 0$

12.2.1 Sylvestrovo kritérium

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

$$\nabla^2 f = \left(\underbrace{\begin{array}{ccc|ccc} \boxed{M1} & \cdots & \cdots & & & \\ \cdots & \boxed{M2} & \cdots & & & \\ \cdots & \cdots & \boxed{M3} & & & \end{array}}_{\text{Hasseova matice}} \right)$$

Vyhodnocení výsledků

- Pokud $\forall i : \det(M_i) > 0 \Leftrightarrow$ matice M je pozitivně definitní.
- Pokud $\forall j : \det(M_{2j+1}) < 0$ a $\det(M_{2j}) > 0 \Leftrightarrow$ matice M je negativně definitní
 - tj.: „–“ (levý horní roh) \rightarrow „+“ \rightarrow „–“ $\rightarrow \dots$ (pravý dolní roh).
- Pokud má matice na diagonále 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

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

12.2.2 Kvadratická forma matice

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

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

- 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

12.3 Tečná rovina

- Obecná rovnice roviny:

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

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

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

Jedná se tedy o rovinu s normálovým vektorem

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

13 Integrály

13.1 Tabulkové integrály

Přehled tabulkových integrálů

$$\int 0 \, dx = c$$

$$\int a \, dx = ax + c$$

$$\int x^n \, dx = \frac{1}{n+1} x^{n+1} + c \text{ pro } x > 0, n \in \mathbb{R} \text{ a } n \neq -1$$

$$\int \frac{1}{x} \, dx = \ln |x| + c \text{ pro } x \neq 0$$

$$\int e^x \, dx = e^x + c$$

$$\int a^x \, dx = \frac{a^x}{\ln(a)} + c \text{ pro } a > 0, \text{ a } a \neq 1$$

$$\int \sin x \, dx = -\cos x + c$$

$$\int \cos x \, dx = \sin x + c$$

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

13.2 Newtonova formule

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

13.3 Integrály přes obdélníkovou oblast

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

13.4 Integrály přes obecnou oblast

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

14 Fuzzy matematika

14.1 Fuzzy množiny

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

14.1.1 T-normy

- Gödelova konorma

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

- Łukasiewiczova konorma

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

- Součinná konorma

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

14.1.2 De Morganovy zákony a T-konormy

- 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

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