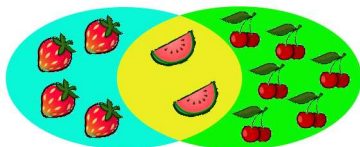


### 3 Množiny, Relace a Funkce

V přehledu matematických formalismů informatiky se v této lekci zaměříme na základní „datové typy“ matematiky, tj. na množiny, relace a funkce. O množinách jste sice jistě slyšeli už na základní škole, ale podstatou našeho předmětu je uvést povětšinou neformálně známé pojmy na patřičnou formální úroveň nutnou pro teoretické základy informatiky.



□

#### Stručný přehled lekce

- \* Uvedení množin a operací množinového kalkulu.
- \* Některé vlastnosti množin, princip inkluze a exkluze.
- \* Relace a definice funkcí, základní vlastnosti.
- \* Posloupnosti a rekurentní vztahy.

## 3.1 Pojem množiny

\* Co je vlastně **množina**? □

Na tuto otázku bohužel není zcela jednoduchá odpověď. . .

- Naivní pohled: „*Množina je soubor prvků a je svými prvky plně určena.*“ □
- Pozor, není skutečného rozdílu mezi „množinami“ a „prvky“.  
Množiny mohou být prvky jiných množin! □
- Příklady:  $\emptyset$ ,  $\{a, b\}$ ,  $\{b, a\}$ ,  $\{a, b, a\}$ ,  $\{\{a, b\}\}$ ,  $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}\}$ ,  
 $\{x \mid x \text{ je liché přirozené číslo}\}$  □

**Značení:** Počet prvků (*mohutnost*) množiny  $A$  zapisujeme  $|A|$ .

- $|\emptyset| = 0$ ,  $|\{\emptyset\}| = 1$ ,  $|\{a, b, c\}| = 3$ ,  $|\{\{a, b\}, c\}| = 2$  □

**Značení** množin a jejich prvků:

- $x \in M$  „ $x$  je *prvkem* množiny  $M$ “. □
- některé vlastnosti  $a \in \{a, b\}$ ,  $a \notin \{\{a, b\}\}$ ,  $\{a, b\} \in \{\{a, b\}\}$ ,
- *prázdná* množina  $\emptyset$ ,  $a \notin \emptyset$ ,  $\emptyset \in \{\emptyset\}$ ,  $\emptyset \notin \emptyset$ ,
- *rovnost* množin  $\{a, b\} = \{b, a\} = \{a, b, a\}$ ,  $\{a, b\} \neq \{\{a, b\}\}$ .

**Definice:** Množina  $A$  je *podmnožinou* množiny  $B$ , právě když každý prvek  $A$  je prvkem  $B$ . Píšeme  $A \subseteq B$  nebo také  $B \supseteq A$ ; říkáme také, že se jedná o *inkluzi*.  $\square$

- Platí  $\{a\} \subseteq \{a\} \subseteq \{a, b\} \not\subseteq \{\{a, b\}\}$ ,  $\emptyset \subseteq \{\emptyset\}$ ,
- $A \subset B$  právě když  $A \subseteq B$  a  $A \neq B$  ( $A$  je *vlastní* podmnožinou  $B$ ).  $\square$

**Definice:** Dvě množiny jsou si *rovny*  $A = B$  právě když  $A \subseteq B$  a  $B \subseteq A$ .

- Podle definice jsou množiny  $A$  a  $B$  stejné, mají-li stejné prvky.  $\square$
- Důkaz rovnosti množin  $A = B$  má obvykle **dvě části**:  
Odděleně se dokáží inkluze  $A \subseteq B$  a  $B \subseteq A$ .

**Značení:** Některé běžné množiny v matematice se značí

- \*  $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$  je množina přirozených čísel,
- \*  $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$  je množina celých čísel,
- \*  $\mathbb{Z}^+ = \{1, 2, 3, \dots\}$  je množina celých kladných čísel,
- \*  $\mathbb{Q}$  je množina racionálních čísel (zlomků).
- \*  $\mathbb{R}$  je množina reálných čísel.  $\square$

**Poznámka:** Tyto uvedené číselné množiny jsou vesměs *nekonečné*, na rozdíl od konečných množin uvažovaných v předchozím „naivním“ pohledu.  $\square$

Pojem nekonečné množiny se přímo v matematice objevil až teprve v 19. století a bylo s ním spojeno několik **paradoxů** ukazujících, že naivní pohled na teorii množin pro nekonečné množiny nedostačuje. My se k problematice nekonečných množin, Kantorově větě a Russelově paradoxu vrátíme v závěru našeho předmětu.

## 3.2 Množinové operace

**Definice:** *Sjednocení*  $\cup$  a *průnik*  $\cap$  dvou množin  $A, B$  definujeme

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \text{ nebo } x \in B\} \square,$$

$$A \cap B = \{x \mid x \in A \text{ a současně } x \in B\} \square$$

- Příklady  $\{a, b, c\} \cup \{a, d\} = \{a, b, c, d\}$ ,  $\{a, b, c\} \cap \{a, d\} = \{a\}$ .  $\square$
- Vždy platí „distributivita“  $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$   
a  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ .  $\square$

**Definice:** Pro libovolný počet množin indexovaných pomocí  $I$  rozšířeně

$$\bigcup_{i \in I} A_i = \{x \mid x \in A_i \text{ pro nějaké } i \in I\} \square,$$

$$\bigcap_{i \in I} A_i = \{x \mid x \in A_i \text{ pro každé } i \in I\} \square$$

- Nechť  $A_i = \{2 \cdot i\}$  pro každé  $i \in \mathbb{N}$ . Pak  $\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i$  je množina všech sudých přirozených čísel.  $\square$
- Nechť  $B_i = \{x \mid x \in \mathbb{N}, x \geq i\}$  pro každé  $i \in \mathbb{N}$ . Pak  $\bigcap_{i \in \mathbb{N}} B_i = \emptyset$ .

**Definice:** *Rozdíl*  $\setminus$  a *symetrický rozdíl*  $\Delta$  dvou množin  $A, B$  definujeme

$$A \setminus B = \{x \mid x \in A \text{ a současně } x \notin B\} \square,$$

$$A \Delta B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A). \square$$

- Příklady  $\{a, b, c\} \setminus \{a, b, d\} = \{c\}$ ,  $\{a, b, c\} \Delta \{a, b, d\} = \{c, d\}$ .  $\square$
- Vždy platí například  $A \setminus (B \cap C) = (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$  apod.  $\square$

**Definice:** Necht'  $A \subseteq M$ . *Doplňěk*  $A$  *vzhledem k*  $M$  je množina  $\overline{A} = M \setminus A$ .

- Jedná se o poněkud specifickou operaci, která **musí být vztažena** vzhledem k *nosné množině*  $M$ !  $\square$
- Je-li  $M = \{a, b, c\}$ , pak  $\overline{\{a, b\}} = \{c\}$ . Je-li  $M = \{a, b\}$ , pak  $\overline{\{a, b\}} = \emptyset$ .  $\square$
- Vždy pro  $A \subseteq M$  platí  $\overline{\overline{A}} = A$  („dvojitý“ doplňěk).  $\square$
- Vždy pro  $A, B \subseteq M$  platí  $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$  a  $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ .  
(Viz Vennovy diagramy.)

## Uspořádané dvojice a kartézský součin

**Definice:** *Uspořádaná dvojice*  $(a, b)$  je zadána množinou  $\{\{a\}, \{a, b\}\}$ . □

**Fakt:** Platí  $(a, b) = (c, d)$  právě když  $a = c$  a současně  $b = d$ . □

**Příklad 3.1.** *Co je podle definice  $(a, a)$ ?* □

$$(a, a) = \{\{a\}, \{a, a\}\} = \{\{a\}, \{a\}\} = \{\{a\}\}. \quad \square$$

**Definice 3.2. Kartézský součin** dvou množin  $A, B$  definujeme jako množinu všech uspořádaných dvojic ze složek z  $A$  a  $B$

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}.$$

□

- Příklady  $\{a, b\} \times \{a\} = \{(a, a), (b, a)\}$ ,  
 $\{c, d\} \times \{a, b\} = \{(c, a), (c, b), (d, a), (d, b)\}$ . □
- Platí  $\emptyset \times X = \emptyset$  pro každou množinu  $X$ . □
- Mnemotechnická pomůcka

$$|A \times B| = |A| \cdot |B|.$$

## Skládání součinu

**Definice:** Pro každé  $k \in \mathbb{N}, k > 0$  definujeme *uspořádanou  $k$ -tici*  $(a_1, \dots, a_k)$  induktivně takto

- $(a_1) = a_1,$
- $(a_1, \dots, a_i, a_{i+1}) = ((a_1, \dots, a_i), a_{i+1}). \square$

**Fakt:** Platí  $(a_1, \dots, a_k) = (b_1, \dots, b_k)$  právě když  $a_i = b_i$  pro každé  $1 \leq i \leq k$ .  $\square$

**Definice *kartézského součinu*** více množin: Pro každé  $k \in \mathbb{N}$  definujeme

$$A_1 \times \dots \times A_k = \{(a_1, \dots, a_k) \mid a_i \in A_i \text{ pro každé } 1 \leq i \leq k\}. \square$$

- Příklad  $\mathbb{Z}^3 = \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \{(i, j, k) \mid i, j, k \in \mathbb{Z}\}.$
- Co je  $A^0$ ?  $\square \quad \{\emptyset\}$ , neboť jediná uspořádaná 0-tice je právě prázdná  $\emptyset$ .

**Poznámka:** Podle uvedené definice **není** součin asociativní, tj. obecně nemusí platit, že  $A \times (B \times C) = (A \times B) \times C$ .  $\square$

V matematické praxi je někdy výhodnější uvažovat „upravenou“ definici, podle níž součin **asociativní je**. Pro účely této přednášky není podstatné, k jaké definici se přikloníme. Prezentované definice a věty „fungují“ pro obě varianty.



## Potenční množina

**Definice 3.3. Potenční množina** množiny  $A$ , neboli množina všech podmnožin, je definovaná vztahem

$$2^A = \{B \mid B \subseteq A\}.$$

- 
- Platí například  $2^{\{a,b\}} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}$ ,
  - $2^\emptyset = \{\emptyset\}$ ,  $2^{\{\emptyset, \{\emptyset\}\}} = \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}$ ,
  - $2^{\{a\} \times \{a,b\}} = \{\emptyset, \{(a, a)\}, \{(a, b)\}, \{(a, a), (a, b)\}\}$ . □

**Věta 3.4.** Počet prvků potenční množiny splňuje  $|2^A| = 2^{|A|}$ . □

**Důkaz:** Stručně indukcí podle  $|A|$ : Pro  $A = \emptyset$  platí  $|2^A| = |\{\emptyset\}| = 1$ .

Pro každý další prvek  $b \notin A$  rozdělíme všechny podmnožiny  $A \cup \{b\}$  „napolovic“ na ty neobsahující  $b$  a na ty obsahující  $b$ , tudíž

$$|2^{A \cup \{b\}}| = 2 \cdot |2^A| = 2^{|A|+1} = 2^{|A \cup \{b\}}.$$

□

### 3.3 Porovnávání a určení množin

**Věta 3.5.** Pro každé dvě množiny  $A, B \subseteq M$  platí  $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$ .  $\square$

**Důkaz** v obou směrech rovnosti.

•  $\overline{A \cup B} \subseteq \overline{A} \cap \overline{B}$ :  $\square$

- \* Pro  $x \in M$  platí  $x \in \overline{A \cup B}$ , právě když  $x \notin A \cup B$ , neboli když zároveň  $x \notin A$  a  $x \notin B$ .
- \* To znamená  $x \in \overline{A}$  a zároveň  $x \in \overline{B}$ , z čehož vyplývá požadované  $x \in \overline{A} \cap \overline{B}$ .  $\square$

•  $\overline{A \cup B} \supseteq \overline{A} \cap \overline{B}$ :

- \* Pro  $x \in M$  platí  $x \in \overline{A} \cap \overline{B}$ , právě když  $x \in \overline{A}$  a zároveň  $x \in \overline{B}$ , neboli když zároveň  $x \notin A$  a  $x \notin B$ .  $\square$
- \* To znamená  $x \notin A \cup B$ , z čehož vyplývá požadované  $x \in \overline{A \cup B}$ .

$\square$

**Věta 3.6.** Pro každé tři množiny  $A, B, C$  platí

$$A \setminus (B \cap C) = (A \setminus B) \cup (A \setminus C). \square$$

**Důkaz.**

- $A \setminus (B \cap C) \subseteq (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$ :
  - \* Je-li  $x \in A \setminus (B \cap C)$ , pak  $x \in A$  a zároveň  $x \notin (B \cap C)$ , neboli  $x \notin B$  nebo  $x \notin C$ .
  - \* Pro první možnost máme  $x \in (A \setminus B)$ , pro druhou  $x \in (A \setminus C)$ .  $\square$
- Naopak  $A \setminus (B \cap C) \supseteq (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$ :
  - \* Je-li  $x \in (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$ , pak  $x \in (A \setminus B)$  nebo  $x \in (A \setminus C)$ .
  - \* Pro první možnost máme  $x \in A$  a zároveň  $x \notin B$ , z čehož plyne  $x \in A$  a zároveň  $x \notin (B \cap C)$ , a tudíž  $x \in A \setminus (B \cap C)$ .  $\square$
  - \* Druhá možnost je analogická.

$\square$

## Charakteristický vektor (pod)množiny

V případech, kdy všechny uvažované množiny jsou podmnožinami nějaké *nosné množiny*  $X$ , což není neobvyklé v programátorských aplikacích, s výhodou využijeme následující reprezentaci množin.

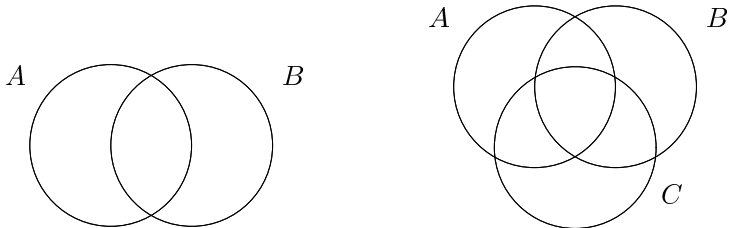
**Definice:** Mějme nosnou množinu  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Pro  $A \subseteq X$  definujeme charakteristický vektor  $\chi_A$  jako

$$\chi_A = (c_1, c_2, \dots, c_n), \text{ kde } c_i = 1 \text{ pro } x_i \in A \text{ a } c_i = 0 \text{ jinak. } \square$$

- Platí  $A = B$  právě když  $\chi_A = \chi_B$ .
- Množinové operace jsou realizovány „bitovými funkcemi“  
sjednocení  $\sim$  OR, průnik  $\sim$  AND, symetrický rozdíl  $\sim$  XOR.

## Princip inkluze a exkluze

Tento důležitý a zajímavý kombinatorický princip je někdy také nazýván „princip zapojení a vypojení“.



**Věta 3.7.** Počet prvků ve sjednocení dvou či tří množin spočítáme:

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|$$

$$|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |A \cap C| - |B \cap C| + |A \cap B \cap C| \square$$

Všimněte si, že větu lze stejně tak využít k výpočtu počtu prvků v průniku množin...

**Příklad 3.8.** Z 1000 televizí jich při první kontrole na výrobní lince má 5 vadnou obrazovku, 10 je poškrábaných a 12 má jinou závadu. Přitom 3 televize mají současně všechny tři vady a 4 jiné jsou poškrábané a mají jinou vadu. Kolik televizí je celkem vadných? □

**Řešení:** Dosazením  $|A| = 5$ ,  $|B| = 10$ ,  $|C| = 12$ ,  $|A \cap B \cap C| = 3$ ,  $|A \cap B| = 3 + 0$ ,  $|A \cap C| = 3 + 0$ ,  $|B \cap C| = 3 + 4$  do Věty 3.7 zjistíme výsledek 17. □□

**Poznámka.** Jen stručně, bez důkazu a bližšího vysvětlení, si uvedeme obecnou formu principu inkluze a exkluze:

$$\left| \bigcup_{j=1}^n A_j \right| = \sum_{\emptyset \neq I \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{|I|-1} \cdot \left| \bigcap_{i \in I} A_i \right|$$

(Jeho znalost nebude v předmětu vyžadována.)

### 3.4 Relace a funkce mezi (nad) množinami

Dalším důležitým základním „datovým typem“ matematiky jsou relace, kterým vzhledem k jejich rozsáhlému použití v informatice věnujeme zvýšenou pozornost.

**Definice 3.9. Relace** mezi množinami  $A_1, \dots, A_k$ , pro  $k \in \mathbb{N}$ , je **libovolná** podmnožina kartézského součinu

$$R \subseteq A_1 \times \dots \times A_k. \square$$

Pokud  $A_1 = \dots = A_k = A$ , hovoříme o  **$k$ -ární relaci  $R$  na  $A$** .  $\square$

Příklady relací.

- $\{(1, a), (2, a)\}$  je relace mezi  $\{1, 2, 3\}$  a  $\{a, b\}$ .
- $\{(i, 2 \cdot i) \mid i \in \mathbb{N}\}$  je binární relace na  $\mathbb{N}$ .  $\square$
- $\{(i, j, i + j) \mid i, j \in \mathbb{N}\}$  je ternární relace na  $\mathbb{N}$ .
- $\{3 \cdot i \mid i \in \mathbb{N}\}$  je unární relace na  $\mathbb{N}$ .  $\square$
- Jaký význam vlastně mají unární a nulární relace na  $A$ ?

## Funkce mezi množinami

**Definice 3.10. (Totální) funkce** z množiny  $A$  do množiny  $B$  je relace  $f$  mezi  $A$  a  $B$  taková, že pro každé  $x \in A$  existuje **právě jedno**  $y \in B$  takové, že  $(x, y) \in f$ .  $\square$

Množina  $A$  se nazývá **definiční obor** a množina  $B$  **obor hodnot** funkce  $f$ .

Neformálně řečeno, ve funkci  $f$  je každé „vstupní“ hodnotě  $x$  přiřazena **jednoznačně** „výstupní“ hodnota  $y$ .

(V obecné relaci počty „přiřazených“ dvojic neomezujeme. . . )  $\square$

**Značení:** Místo  $(x, y) \in f$  píšeme obvykle  $f(x) = y$ .

Zápis  $f : A \rightarrow B$  říká, že  $f$  je funkce s def. oborem  $A$  a oborem hodnot  $B$ .  $\square$

Funkcím se také říká **zobrazení**.

- Definujeme funkci  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  předpisem  $f(x) = x + 8$ . Tj.  $f = \{(x, x + 8) \mid x \in \mathbb{N}\}$ .  $\square$
- Definujeme funkci  $plus : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  předpisem  $plus(i, j) = i + j$ . Tj.  $plus = \{(i, j, i + j) \mid i, j \in \mathbb{N}\}$ .



**Definice:** Pokud naši definici funkce upravíme tak, že požadujeme pro každé  $x \in A$  **nejvýše jedno**  $y \in B$  takové, že  $(x, y) \in f$ , obdržíme definici **parciální funkce** z  $A$  do  $B$ .  $\square$

V parciální funkci  $p$  nemusí být pro některé „vstupní“ hodnoty  $x$  funkční hodnota definována.

Pro **nedefinovanou** hodnotu používáme znak  $\perp$ .  $\square$

Další příklady funkcí.

- Definujeme parciální funkci  $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$  předpisem

$$f(x) = \begin{cases} 3 + x & \text{jestliže } x \geq 0, \\ \perp & \text{jinak.} \end{cases}$$

Tj.  $f = \{(x, 3 + x) \mid x \in \mathbb{N}\}$ .  $\square$

- Také funkce  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  daná běžným analytickým předpisem

$$f(x) = \sqrt{x}$$

je jen parciální – není definována pro  $x < 0$ .  $\square$

- Co je relace, přiřazující lidem v ČR jejich rodná čísla?

### 3.5 Posloupnosti a rekurentní vztahy

**Definice:** Funkce  $p : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  se nazývá *posloupnost*.

Mimo „funkčního“ zápisu  $p(n)$  často používáme „indexovou“ formu zápisu  $p_n$ . □

**Poznámka:** Obor hodnot posloupnosti může být i **jiný než reálná** čísla. Na posloupnost se také díváme jako na „seřazení“ vybraných prvků z oboru hodnot, s povoleným opakováním hodnot (nemusí být prostá). □

Také def. obor posl. může začínat od nuly nebo i od jedničky, jak je v aplikacích potřeba.

- Příklady posloupností:

- \*  $p_0 = 0, p_1 = 2, \dots, p_i = 2i, \dots$  je posloupnost sudých nezáporných čísel. □

- \*  $3, 3.1, 3.14, 3.141, \dots$  je posloupnost postupných dekadických rozvoju  $\pi$ .

- \*  $1, -1, 1, -1, \dots$  je posloupnost určená vztahem  $p_i = (-1)^i, i \geq 0$ . □

- \* Pokud chceme stejnou posloupnost  $1, -1, 1, -1, \dots$  zadat jako  $q_i, i \geq 1$ , tak ji určíme vzorcem  $q_i = (-1)^{i-1}$ . □

- Posloupnost je *rostoucí* (či *klesající*), pokud  $p_{n+1} > p_n$  ( $p_{n+1} < p_n$ ) pro všechna  $n$ .

## Rekurentní definice posloupnosti

Slovem *rekurentní* označujeme takové definice (či popisy), které se v jistých bodech odvolávají samy na sebe.

(Už jste se setkali s „rekurzí“ při programování? A víte, co znamená?) □

Ukázky **rekurentních vztahů**:

- Zadáme-li posloupnost  $p_n$  vztahy  $p_0 = 1$  a  $p_n = 2p_{n-1}$  pro  $n > 0$ , pak platí  $p_n = 2^n$  pro všechna  $n$ . □
- Obdobně můžeme zadat posloupnost  $q_n$  vztahy  $q_1 = 1$  a  $q_n = q_{n-1} + n$  pro  $n > 1$ . Potom platí  $q_n = \frac{1}{2}n(n+1)$  pro všechna  $n$ .  
Uměli byste toto dokázat indukcí? □
- Známa Fibonacciho posloupnost je zadána vztahy  $f_1 = f_2 = 1$  a  $f_n = f_{n-1} + f_{n-2}$  pro  $n > 2$ .