

# Jakýsi úvod do diskrétní matematiky

Áďa Klepáčovic

25. července 2023



# Obsah

<b>1</b>	<b>Zajímavé problémy</b>	<b>1</b>
1.1	Problém tří domů a tří studní . . . . .	2
1.2	Hrátky s puntíky . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Úvodní pojmy</b>	<b>5</b>
2.1	Logické spojky a kvantifikátory . . . . .	6
2.2	Množiny . . . . .	8
2.3	Relace . . . . .	11
2.3.1	Kreslení relací . . . . .	11
2.3.2	Skládání relací . . . . .	12
2.4	Ekvivalence . . . . .	15
2.5	Zobrazení . . . . .	19
2.6	Uspořádání . . . . .	26
2.7	Matematická indukce . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Počítání</b>	<b>36</b>
3.1	Zobrazení a podmnožiny . . . . .	37
3.2	Permutace . . . . .	41
3.2.1	Zápis permutací . . . . .	42
3.2.2	Skládání permutací . . . . .	44
3.2.3	Problém sta věžňů . . . . .	48
3.3	Kombinační čísla . . . . .	53

3.3.1	Problém rozkladu na sčítance . . . . .	56
3.3.2	Pár vlastností kombinačních čísel . . . . .	57
3.4	Princip inkluze a exkluze . . . . .	63
3.4.1	Problém šatnářky . . . . .	72
<b>4</b>	<b>Teorie grafů</b>	<b>76</b>
4.1	Pohyb v grafu . . . . .	83
4.2	Stromy . . . . .	88
4.2.1	Minimální kostra . . . . .	91
4.2.2	Kruskalův algoritmus . . . . .	94
4.3	Jordanovo centrum . . . . .	98
4.3.1	Floydův-Warshallův algoritmus . . . . .	103
4.4	Vzdálenost vrcholů . . . . .	107
4.4.1	Dijkstrův algoritmus . . . . .	109
4.4.2	Hurá na výlet . . . . .	115
4.5	Graf jako algebraická struktura . . . . .	121
4.5.1	Podgrafy, souvislost a metrika . . . . .	123
4.5.2	Grafové homomorfismy . . . . .	131
4.6	Kreslení grafů . . . . .	135
4.6.1	Jordanova věta o kružnici . . . . .	138
4.6.2	Rovinné grafy . . . . .	139
4.6.3	Kuratowskiho věta . . . . .	149





## 1 Zajímavé problémy

Jednou z hlavních a oblíbených podmnožin diskretní matematiky a kombinatoriky je *teorie grafů*. Jednoduše řečeno, graf je množina bodů – vrcholů, mezi některýmiž vedou spojnice – hrany.

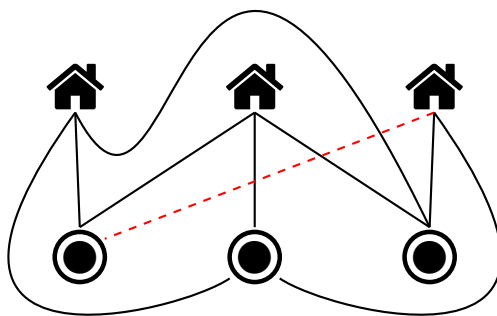
Představíme si pár úloh jako ze života, jak bývá v matematice zvykem, jejichž zdánlivá nevinnost je v rozporu s jejich významem pro rozvoj teorie.

## 1.1 Problém tří domů a tří studní

V zemi za sedmero horami a sedmero řekami žili byli tři sousedi. Každý z nich vlastnil rodinný domek a dělili se o vodu ze tří blízkých studní. Jednou se ale sousedi po sporu rozkmotřili a už se nechtěli ani vidět. Potřebovali ale pitnou vodu. Každý se odmítl vzdát nároku na nějakou ze studní, tak si jako poslední společný čin najali dvorního architekta, by nechal postavit cesty od každého domu ke každé studni. Cesty se nesměly nikde potkat, aby do sebe sousedi na cestě pro vodu náhodou nenarazili.

Dvorní architekt, probdév tři dny a tři noci hledaje způsob, jak nasupené sousedy uspokojit, klekl nakonec únavou a prohlásil, že cesty bez křížení vystavět nelze.

My s ním souhlasíme, ale není lehké najít způsob, jak úlohu matematicky formalizovat, a podat důkaz.

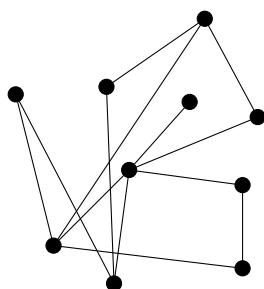


Obrázek 1: Tři domy a tři studně.



## 1.2 Hrátky s puntíky

Ukážeme si ještě dvě pěkné úlohy s puntíky a čarami. Mějme třeba deset puntíků v rovině a pár z nich spojíme čarami, jako na [obrázku 2](#).



Obrázek 2: Náhodný graf na deseti vrcholech.

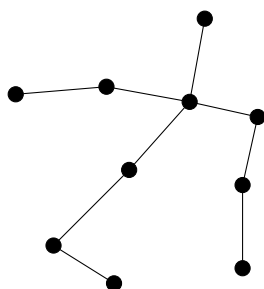
Otázka, kterou se budeme časem zabývat zní „Kolik maximálně mohu nakreslit spojnic, než mi vznikne trojúhelník?“ Trojúhelníkem zde myslíme trojici bodů, z nichž každé dva jsou spojeny. Do tohoto grafu se určitě ještě dají nějaké přikreslit, ale kolik přesně? A jak tuto úlohu řešit obecně pro jakýkoliv počet bodů?

Podobně zajímavá, ale už víc algoritmická otázka, by zněla „Jak poznám, jestli v nějakém grafu existuje trojúhelník?“. Samozřejmě by šlo se prostě podívat na každou jednu trojici bodů, ale jde to i líp?

Ještě na pár odstavců zůstaneme u spojených puntíků. Úloha, která se ukázala jako zásadní v teorii grafů má co dělat s cestami. *Cestou* v grafu nazveme posloupnost bodů – vrcholů, takovou, že mezi sousedními vrcholy na cestě vždycky vede spojnice. Jinak řečeno, mohu se v klidu projít od jednoho vrcholu k druhému, aniž bych musel skákat mezi vrcholy. Naším úkolem je najít takovou množinu spojnic – hran, že se mezi každými dvěma vrcholy dá projít po cestě.

Pro deset vrcholů jedno možné řešení vidíte na [obrázku 3](#).

Je jednoduché si rozmyslet, kolik nejméně hran je třeba nakreslit. Ovšem, co když můžeme vybírat jen z nějaké předem dané množiny? Řešení pak nemusí vždycky existovat (může se totiž stát, že žádné hrany k dispozici nemáme). Dá se nějak efektivně poznat, kdy úlohu lze řešit a kdy ne? A co třeba otázka, kolik existuje řešení s minimálním počtem hran; co řešení, součet přes všechny jeho hrany je nejmenší? V této obecné podobě



Obrázek 3: Minimální kostra grafu na deseti vrcholech.

se úloze (i jejímu řešení) říká *minimální kostra* grafu a v budoucnu ji, stejně jako předchozí dvě úlohy, potkáme.

## 2 Úvodní pojmy

Žádná matematická disciplína se neobejde bez pochopení základů logiky a teorie množin. Pro jistotu zde nejnnutnější části připomeneme, ale tyto krátké úryvky nezamýšlejí naučit, leč osvěžit.

## 2.1 Logické spojky a kvantifikátory

**Definice 2.1.1 (Výrok).** Výrokem nazveme jakoukoli větu, o které lze rozhodnout, zda je pravdivá, či nikoliv.

**Příklad.** Věty „Je mi zle.“ a „Sumec je drůbež.“ jsou výroky, zatímco „Tvoje máma.“ a „Cos’ dostala z matiky?“ nikoliževěk.

Je též dlužno mít na paměti, že naše znalost pravdivosti věty nemění nic na tom, jestli daná věta je, nebo není výrokem. Třeba „Do pěti století kolonizujeme celou Sluneční soustavu.“ je zcela jistě výrok.

Další text vyžaduje znalost operátorů  $\neg, \wedge, \vee, \Rightarrow$  a  $\Leftrightarrow$ . Je-li  $x$  výrok „Prší.“ a  $y$  výrok „Vezmu si deštník.“, pak

- výrok  $\neg x$  znamená „**Ne**prší.“,
- výrok  $x \wedge y$  znamená „Prší **a** vezmu si deštník.“,
- výrok  $x \vee y$  znamená „Prší **nebo** si vezmu deštník.“,
- výrok  $x \Rightarrow y$  znamená „**Když** prší, **tak** si vezmu deštník.“ a
- výrok  $x \Leftrightarrow y$  znamená „Prší, **právě tehdy když** si vezmu deštník.“

### Výstraha.

- Logická spojka  $\vee$  **není vylučná**. Tedy  $x \vee y$  platí v situaci, kdy
  - platí pouze  $x$ ,
  - platí pouze  $y$ ,
  - platí  $x$  i  $y$ .
- Výrok  $x \Rightarrow y$  je vždy **pravdivý**, pokud  $x$  je **lživý**. Jinak řečeno,  $x \Rightarrow y$  platí za situace, kdy
  - platí  $x$  i  $y$ ,
  - neplatí  $x$  a platí  $y$ ,
  - neplatí  $x$  a neplatí  $y$ .

Jako znalost logických spojek je kritická i znalost kvantifikátorů  $\forall$  a  $\exists$ , které se čtou „pro všechny“ a „existuje“, resp.

Pokud je  $p(x)$  výrok závislý na proměnné  $x$  (třeba „ $x$  je sudé.“), pak výrok

- $\forall x \in \mathbb{N} : p(x)$  zní „Všechna přirozená čísla jsou sudá.“ a
- $\exists x \in \mathbb{N} : p(x)$  zní „Existuje sudé přirozené číslo.“

Budeme rovněž užívat kvantifikátory  $\exists!$  a  $\nexists$ , které znamenají „existuje přesně jeden“ a „neexistuje“.

Podáno intuitivně: chci-li tvrdit, že  $\forall x \in \mathbb{N} : p(x)$ , musím dokázat, že ať mi nepřítel dá **jakékoliv** přirozené číslo  $x$ , tak  $p(x)$  platí. Naopak, dokázat  $\exists x \in \mathbb{N} : p(x)$  je obvykle zásadně jednodušší, neboť musím pouze najít **jedno** přirozené číslo  $x$ , pro které  $p(x)$  platí.

## 2.2 Množiny

Požaduji znalost značek  $\in, \cap, \cup, \setminus, \times$  a  $\subseteq$ . Pro připomenutí, jsou-li  $A, B$  dvě množiny, pak

- výrok  $x \in A$  říká, že „ $x$  je prvkem  $A$ .“ nebo „ $x$  patří do  $A$ .“;
- $A \cap B$  je **průnik**  $A$  s  $B$ , čili množina obsahující prvky, které patří jak do  $A$ , tak do  $B$ ;
- $A \cup B$  je **sjednocení**  $A$  s  $B$ , čili množina obsahující prvky, které patří do  $A$  nebo do  $B$ ;
- $A \setminus B$  je **rozdíl**  $A$  s  $B$ , čili množina obsahující prvky, které patří do  $A$  a nepatří do  $B$ ;
- $A \times B$  je **součin**  $A$  s  $B$ , čili množina **uspořádaných** dvojic  $(a, b)$ , kde  $a \in A$  a  $b \in B$ . Uspořádaná dvojice zde znamená, že  $(a, b) \neq (b, a)$ , tedy záleží na tom, který prvek je první a který druhý;
- výrok  $A \subseteq B$  říká, že  $A$  je podmnožinou  $B$ , tedy, že každý prvek  $A$  je rovněž prvkem  $B$ .

Pro mnohonásobné a nekonečné verze budeme používat stejné symboly (s výjimkou součinu). Tedy, mám-li množiny  $A_1, \dots, A_n$ , pak

- $\bigcap_{i=1}^n A_i$  je jejich průnik,
- $\bigcup_{i=1}^n A_i$  je jejich sjednocení a
- $\prod_{i=1}^n A_i$  je jejich součin.

Když jsou počáteční a koncový index známy z kontextu, budeme je vynechávat a psát pouze třeba  $\bigcup A_i$ . Součin množiny se sebou samou budeme často zkracovat mocninným zápisem, třeba  $A \times A \times A = A^3$ .

**Příklad.** Je-li  $A = \{1, 3, 4\}$  a  $B = \{2, 4, 5\}$ , pak

- $A \cap B = \{4\}$ ,
- $A \cup B = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,
- $A \setminus B = \{1, 3\}$  a

$$\bullet A \times B = \{(1, 2), (1, 4), (1, 5), (3, 2), (3, 4), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (4, 5)\}.$$

**Definice 2.2.1.** Je-li  $A$  množina, pak

- $\#A$  značí **počet prvků**  $A$  neboli **velikost**  $A$ ,
- $2^A$  značí **množinu všech podmnožin**  $A$ , čili

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

Pro nekonečné množiny píšeme  $\#A = \infty$ .

**Výstraha.** Pojem velikosti takto zavedený není korektně definovaný. Není totiž jasné, co by měl „počet“ prvků znamenat. Pojem *bijekce* ze sekce o zobrazeních tento problém vyřeší.

**Tvrzení 2.2.2** (Vlastnosti velikosti množiny).

- (1)  $\#A \times B = \#A \#B$ .
- (2)  $\#2^A = 2^{\#A}$ .

**Důkaz.**

- (1) Pro každý prvek  $a \in A$  je v  $A \times B$  právě  $\#B$  dvojic  $(a, b)$ , kde  $b \in B$ . Jelikož prvků  $a \in A$  je z definice  $\#A$  a každému odpovídá  $\#B$  dvojic  $(a, b)$ , je celkový počet uspořádaných dvojic v  $A \times B$  právě  $\#A \#B$ .
- (2) Pro nekonečné množiny tvrzení platí zřejmě. Předpokládejme, že  $A$  je konečná.

Očíslujeme si podmnožiny  $A$  binárními čísly délky  $\#A$ . Každá podmnožina  $A$  vznikne totiž tak, že procházíme postupně všechny prvky  $A$  a u každého se rozhodujeme, zda ho do ní zařadíme či nikoliv. Kladnému rozhodnutí bude odpovídat cifra 1 a zápornému 0. Má-li  $A$  řekněme 5 prvků, pak podmnožina očíslovaná číslem 00110 je podmnožina, která obsahuje pouze 3. a 4. prvek z  $A$  (při libovolném, **ale fixním**, očíslování samotné množiny  $A$ ).

Odtud plyne, že  $A$  má tolik podmnožin, kolik je různých binárních čísel délky  $\#A$ . Těch je však  $2^{\#A}$ , jak jsme chtěli.  $\square$



## 2.3 Relace

Pojem *relace* zobecňuje věci jako zobrazení (se kterým jste se setkali, ale říkali jste mu buhvíproč funkce) nebo uspořádání (které taky znáte, jen vám buhvíproč neprozradili, oč jde).

Základní myšlenkou je to, že i relace – vztahy mezi objekty se dají pomocí množin (a jejich součinu) úspěšně definovat. Celá matematika, kterou jste dosud poznali, je založená na *teorii množin*, jinak řečeno, **všechno** je množina.

**Definice 2.3.1 (Relace).** Jsou-li  $A, B$  množiny, pak **relací** mezi  $A$  a  $B$  nazveme *libovolnou* podmnožinu  $A \times B$ . Je-li  $A = B$ , pak  $R$  nazýváme relací na  $A$ .

Pojem relace v matematice je založen na konceptu, že vztah mezi množinami je dokonale popsán výpisem všech dvojic prvků, které v tom vztahu jsou. To se trochu liší od běžného chápání slova „vztah“. Asi byste nebyli úplně spokojeni, kdybychom vám tvrdili, že vztah manželský na množině všech lidí je to samé, co výpis všech manželských párů. Z toho důvodu bude asi lepší se držet latinské verze, „relace“.

Protože nejstarší typy relací, mezi nimi třeba  $<$  nebo  $=$ , lidé používali ještě před vznikem samotné teorie množin, značení je zde trochu matoucí. Fakt, že dvojice  $(x, y) \in A \times B$  je v relaci  $R$ , nezapisujeme (jak by se čekalo)  $(x, y) \in R$ , ale spíš  $xRy$ . Podobně jako nepíšeme  $(x, y) \in <$ , ale  $x < y$ .

Jako spoustu věcí v matematice, relace je dobré si umět vizualizovat. Ukážeme si teď tři standardní způsoby, jak si lidé relace kreslí.

### 2.3.1 Kreslení relací

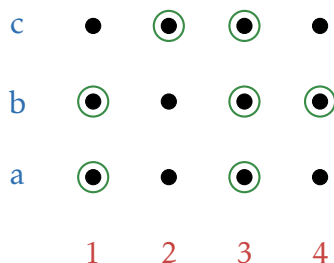
Po celou podsekcí budeme předpokládat, že máme množiny  $A = \{1, 2, 3, 4\}$  a  $B = \{a, b, c\}$ .

Jedním ze způsobů, jak se dají kreslit relace, je *mříž*. Uvážíme relaci

$$R = \{(1, a), (1, b), (2, c), (3, a), (3, b), (3, c), (4, b)\}$$

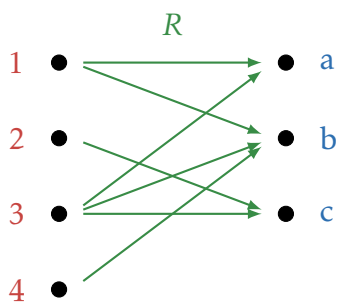
mezi  $A$  a  $B$ . Vizualizaci součinu  $A \times B$  a relace  $R$  pomocí mříže vidíte na

obrázku 4.



Obrázek 4: Kreslení relace  $R \subseteq A \times B$  pomocí mříže.

Ještě jeden užitečný způsob kreslení, který funguje pro obecné relace, je kreslení pomocí šipek. V zásadě si člověk zobrazí obě množiny jako sloupce bodů a mezi příslušnými body kreslí šipky. Například jako na obrázku 5.



Obrázek 5: Kreslení relace  $R \subseteq A \times B$  pomocí šipek.

Tenhle způsob se může zdát méně přehledný než mříž, ale má svoje nesporné využití, především v oblasti *skládání* relací, kterým se budeme zabývat za chvíli.

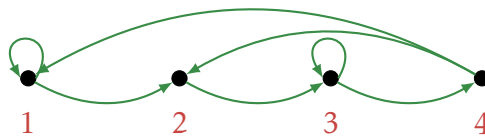
Ještě před tím si ale ukážeme způsob, jak přehledně kreslit relace na nějaké množině. Řekněme, že tentokrát je třeba

$$R := \{(1, 1), (1, 2), (2, 3), (3, 4), (3, 3), (4, 1), (4, 2)\}$$

relace na množině  $A$ . Množinu  $A$  si nakreslíme jako body v rovině a relaci  $R$  jako šipky a smyčky. Vizte obrázek 6.

### 2.3.2 Skládání relací

V této podsekci si řekneme, co znamená, že dvě (nebo více) relace složíme dohromady. Tato operace se dá vnímat jako jakési „zobecnění“ skládání

Obrázek 6: Kreslení relace  $R$  na  $A$  pomocí šipek a smyček.

zobrazení/funkcí. Jak si ale ukážeme, zobrazení jsou speciálním typem relací, takže takhle představa není úplně vhodná.

Pro jednoduchost se budeme soustředit na relace na nějaké množině  $A$ . Tohle ovšem není nutné; mám-li relaci  $R \subseteq A \times B$  a relaci  $S \subseteq B \times C$ , vždy je mohu složit a dostat relaci mezi  $A$  a  $C$ .

Skládání relací není nijak divoká věc a vztahy (například mezi lidmi) v životě běžně skládáme, ale málokdy se na to asi díváme tímto způsobem. Například, řekněme, že **Adéla** má přítelkyni **Simona** a **Simona** má přítelkyni **Terezu**. Když složíme relace „býti přítelkyně **Adély**“ a „býti přítelkyně **Simony**“ dostaneme relaci, ve které je **Tereza** přítelkyně **Adély**. Na druhý příklad, třeba samotné přísloví „Nepřítel mého nepřítele je můj přítel.“, se dá vyložit jako skládání relací.

Teď formálně.

**Definice 2.3.2 (Složení relací).** Mějme množinu  $A$  a relace  $R, S \subseteq A \times A = A^2$ . Složením relací  $R$  a  $S$  nazveme množinu

$$\{(x, z) \in A^2 \mid \exists y \in A : xRy \wedge yRz\}$$

a značíme ji  $R \circ S$ .

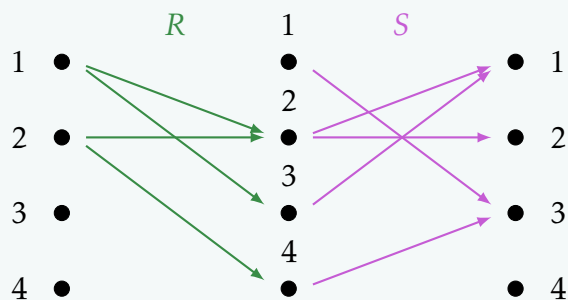
Řečeno asi možná třeba trošku lidštěji, když pro dané  $x, z \in A$  najdu takový prvek  $y \in A$ , že dvojice  $(x, y)$  je v relaci  $R$  a dvojice  $(y, z)$  je v relaci  $S$ , pak  $(x, z)$  je v relaci  $R \circ S$ . Vlastně  $(x, y)$  a  $(y, z)$  slepím dohromady skrze  $y$ .

**Příklad.** Řekněme, že je  $A = \{1, 2, 3, 4\}$  a máme relace

$$R := \{(1, 2), (1, 3), (2, 2), (2, 4)\},$$

$$S := \{(1, 3), (2, 1), (2, 2), (3, 1), (4, 3)\}$$

na  $A$ . V [podsekcí o kreslení relací](#) jsme zmínili, že šipky jsou velmi užitečné při skládání. Teď uvidíte proč. Když si obě relace nakreslíme přímo vedle sebe, dostaneme [obrázek 7](#).



Obrázek 7: Složení relací  $R$  a  $S$ .

V roli  $x$  z [Definice 2.3.2](#) je zde první sloupec, v roli  $y$  druhý a v roli  $z$  třetí. Čili, prvek  $(x, z)$  bude v relaci  $R \circ S$  jenom tehdy, když najdu v prostředním sloupci prvek  $y$  (aspoň jeden, ale klidně víc), přes který dokážu po šípkách dojít z  $x$  do  $z$ .

Z obrázku je teď už zřejmé, že

$$R \circ S = \{(1, 1), (1, 2), (2, 1), (2, 2), (2, 3)\}.$$

## 2.4 Ekvivalence

Jedním speciálním typem relace na množině je tzv. *ekvivalence*. Důvodem pro tenhle název je fakt, že prvky, které jsou v relaci ekvivalence, jde za jisté interpretace považovat za „stejné“. Asi nejobyčejnější příklad užití ekvivalence je při definici množiny racionálních čísel,  $\mathbb{Q}$ , jak si brzy ukážeme. Nejprve ale definice ekvivalence.

**Definice 2.4.1 (Ekvivalence).** Relace  $R \subseteq A^2$  je

- **reflexivní**, když je každý prvek v relaci sám se sebou, tj.

$$xRx \quad \forall x \in A;$$

- **symetrická**, když ke každé dvojici obsahuje i opačně uspořádanou, tj.

$$xRy \Rightarrow yRx \quad \forall x, y \in A;$$

- **transitivní**, když ke každým dvěma dvojicím, které jdou „slepit přes prostředníka“ (vizte [definici skládání](#)) obsahuje i tu slepenou dvojici. Formálně,

$$xRy \wedge yRz \Rightarrow xRz \quad \forall x, y, z \in A.$$

Relace, která je *reflexivní*, *symetrická* a *transitivní* se nazývá **ekvivalence**.

Vlastnosti reflexivity, symetrie a transitivity nejsou principiálně v žádném vztahu. Existují relace, které jsou jen reflexivní, ale nejsou ani symetrické ani transitivní apod. Jeden příklad za všechny.

**Příklad.** Položme  $A := \{1, 2, 3, 4\}$ . Relace

- $\{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4), (1, 2), (2, 3)\}$  je reflexivní, ale nikoli symetrická nebo transitivní;
- $\{(1, 1), (2, 2), (1, 2), (2, 1), (2, 3), (3, 2)\}$  je symetrická, ale není reflexivní ani transitivní;

- $\{(1, 2), (2, 3), (1, 3), (3, 4), (1, 4), (2, 4)\}$  je transitivní, ale není reflexivní ani symetrická.

Ekvivalence je velmi přirozený způsob, jak ztotožnit prvky, které bychom, často z technických důvodů, nechtěli považovat za různé. Vráťme-li se k příkladu zlomků, asi bychom nechtěli vidět třeba  $1/5$  a  $2/10$  jako dva různé zlomky. Zlomek  $1/5$  v tomto smyslu je vlastně množina všech zlomků, které představují stejnou hodnotu. Tuto intuici zobecňuje pojem *třídy ekvivalence*.

**Definice 2.4.2 (Třída ekvivalence).** Mějme ekvivalenci  $R \subseteq A^2$  a prvek  $x \in A$ . **Třídou ekvivalence** prvku  $x$  **vzhledem k  $R$**  myslíme množinu

$$[x]_R := \{y \in A \mid xRy\},$$

čili množinu všech prvků, které jsou s ním v relaci  $R$ . Dolní index  $R$  v zápisu  $[x]_R$  budeme často vynechávat a psát jen  $[x]$ . Uvědomme si, že nezáleží na tom, jestli napíšu  $xRy$  nebo  $yRx$  v definici výše, protože  $R$  je symetrická.

**Příklad (Racionální čísla).** Symbolem  $\mathbb{N}$  značím množinu přirozených čísel  $\{1, 2, 3, \dots\}$  a symbolem  $\mathbb{Z}$  množinu celých čísel, tj. množinu přirozených čísel, čísel k nim opačných a 0.

Racionální čísla se dají definovat jako všechny možné podíly celého čísla přirozeným. Když si zlomek  $a/b$ , kde  $a \in \mathbb{Z}$  a  $b \in \mathbb{N}$  představím jako uspořádanou dvojici  $(a, b)$ , tj. (čitatel, jmenovatel), pak množina

$$A := \{(a, b) \mid a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N}\}$$

je množina všech zlomků.

Ujasníme si, kdy dva zlomky považujeme za stejné. Snadno úpravou člověk dostane, že

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \Leftrightarrow ad = bc,$$

což nám dává návod, jak definovat ekvivalenci na množině všech zlomků,  $A$ . Relaci  $R \subseteq A^2$  definujeme tím způsobem, že  $(a, b)R(c, d)$  právě tehdy, když  $ad = bc$ . Správně bychom měli dokázat, že to je opravdu ekvivalence, ale tím se nehodláme zdržovat.

Množina racionálních čísel, na kterou jste zvyklí, se pak nejelegantněji definuje jako množina tříd ekvivalence prvků z  $A$  vzhledem k  $R$ . Konkrétně,

$$\mathbb{Q} := \{[(a, b)]_R \mid a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N}\}.$$

Třídy ekvivalence jistým způsobem „parcelují“ množinu  $A$  na disjunktní (mající prázdný průnik) množiny. To je obsahem následujícího tvrzení, jehož důkaz je cvičení.

**Tvrzení 2.4.3 (Vlastnosti tříd ekvivalence).** Nechť  $A$  je libovolná množina a  $R$  je ekvivalence na  $A$ . Pak

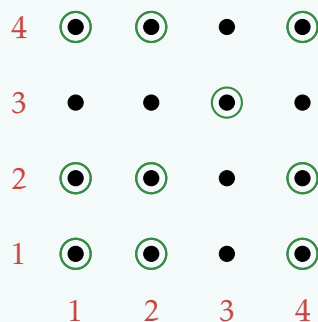
- (1)  $[x] \neq \emptyset$  pro všechna  $x \in A$ ,
- (2) Buď  $[x] = [y]$ , nebo  $[x] \cap [y] = \emptyset$  pro všechna  $x, y \in A$ .

**Důkaz.** Cvičení. □

**Příklad.** Řekněme, že  $A$  je naše oblíbená množina  $\{1, 2, 3, 4\}$ . Snadno ověříme, že

$$R := \{(1, 1), (1, 2), (1, 4), (2, 1), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 1), (4, 2), (4, 4)\}$$

je ekvivalence na  $A$ . Její mříž vidíte na [obrázku 8](#).

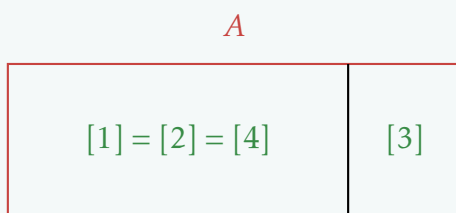


Obrázek 8: Mříž ekvivalence  $R$  na množině  $A$ .

Obecně, mříž každé ekvivalence má zaplněnou diagonálu z levého dolního rohu do pravého horního (kvůli reflexivitě) a je symetrická

podle této diagonály (kvůli symetrii). Jak na první pohled poznat transitivitu nevím.

Všimněme si, že  $1R2$  a  $1R4$ , takže  $2 \in [1]$  a  $4 \in [1]$ . Podle [tvrzení nahoře](#) je  $[1] = [2] = [4]$ , protože tyto třídy ekvivalence nejsou disjunktní. Naopak, třída  $[3]$  je disjunktní s každou z nich. Můžeme proto rozdělit množinu  $A$  na třídy ekvivalence třeba jako  $A = [1] \cup [3]$ . Náhled na [obrázku 9](#).



Obrázek 9: Množina  $A$  rozdělená na třídy ekvivalence  $R$ .

Pár cvičení nakonec.

**Cvičení 2.4.1.** Dokažte [Tvrzení 2.4.3](#).

**Cvičení 2.4.2** (Skládání relací vs. transitivita). Dokažte, že relace (ne nutně ekvivalence!)  $R$  je transitivní, právě tehdy když  $R \circ R \subseteq R$ .

**Pozor!** Píšeme „právě tehdy, když“, tedy se jedná o (logickou) ekvivalenci. Je třeba dokázat, že když  $R \circ R \subseteq R$ , pak  $R$  je transitivní, a že když je  $R$  transitivní, pak  $R \circ R \subseteq R$ .



## 2.5 Zobrazení

Druhým ze tří zvláště užitečných typů relace je tzv. *zobrazení*, které spíš znáte pod pojmem *funkce*. Narozdíl od ekvivalence, zobrazení budeme uvažovat jak na množině, tak mezi množinami.

Definující vlastností funkce/zobrazení je fakt, že každý prvek nezobrazí buď na nic (pokud v něm „není definováno“) nebo na jeden jiný prvek. V jazyce relací to znamená, že každý prvek z množiny „nalevo“ je v relaci s maximálně jedním prvkem „napravo“.

**Definice 2.5.1 (Zobrazení).** Relaci  $R$  mezi množinami  $A$  a  $B$  nazveme **zobrazením**, pokud pro každé  $x \in A$  existuje **nejvýše jedno**  $y \in B$  takové, že  $xRy$ .

**Příklad.** Mezi množinami  $A := \{1, 2, 3, 4\}$  a  $B := \{a, b, c\}$  uvažme zobrazení

$$R := \{(1, a), (2, a), (3, c), (4, b)\} \subseteq A \times B.$$

Jeho mříž vypadá následovně.

c	•	•	⊙	•
b	•	•	•	⊙
a	⊙	⊙	•	•
	1	2	3	4

Obrázek 10: Mříž zobrazení  $R \subseteq A \times B$ .

Fakt, že relace je zobrazení poznáte z její mříže velmi snadno tak, že (za předpokladu, že prvky levé množiny píšete vždy dole) v každém sloupci je **maximálně** jeden zelený kroužek.

Jelikož lidé přemýšleli o zobrazeních dříve než o relacích, je jejich zápis a názvosloví dost odlišné (a dost zmatené). Budeme je v dalších textu pravidelně užívat, takže vás s ním chca nechca musíme seznámit.

Pro zápis zobrazení se obvykle používají malá písmena latinské abecedy počínaje  $f$  (pro function) nebo malá písmena řecké abecedy počínaje  $\varphi$  (čteno „fí“, opět pro function). Fakt, že relace  $f \subseteq A \times B$  je zobrazení mezi  $A$  a  $B$  (též říkáme „z  $A$  do  $B$ “), zapisujeme obvykle jako

$$f : A \rightarrow B \quad \text{nebo} \quad A \xrightarrow{f} B.$$

Několik dalších názvů:

- Fakt, že  $xfy$  pro  $x \in A$  a  $y \in B$ , zapisujeme jako  $f(x) = y$  nebo jako  $f : x \mapsto y$ . Prvku  $y$  říkáme **obraz** prvku  $x$  **při zobrazení  $f$** . **Obrazem zobrazení  $f$**  pak myslíme množinu všech obrazů prvků z  $A$  a značíme ji  $\text{im } f$  (z angl. **image**). Konkrétně,

$$\text{im } f := \{f(x) \mid x \in A\}.$$

- Pro dané  $y \in B$  značíme množinu všech  $x \in A$  takových, že  $f(x) = y$ , jako  $f^{-1}(y)$  a říkáme jí **vzor** prvku  $y$  **při zobrazení  $f$** . Čili,  $x \in f^{-1}(y)$  vyjadřuje fakt, že  $f(x) = y$ .
- Pokud  $f : A \rightarrow B$ , množině  $A$  říkáme **doména zobrazení  $f$**  a množině  $B$  **kodoména zobrazení  $f$** .

**Výstraha.** Vzor prvku  $y \in B$  při zobrazení  $f$  je **množina**. **Definice zobrazení** mi říká jenom, že jedno  $x \in A$  se zobrazí na jedno  $y \in B$ . To ale nebrání tomu, aby se víc různých prvků z  $A$  zobrazilo na **ten samý** prvek z  $B$ . Naopak, množina  $f^{-1}(y)$  může být i prázdná, pokud se na  $y$  nezobrazuje žádný prvek z  $A$ .

**Příklad (Kvadratická funkce).** Kvadratická funkce daná předpisem

$$f(x) := x^2 + 4x + 5$$

je zobrazení  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , čili jeho **doménou** i **kodoménou** jsou reálná čísla. **Obrazem** prvku 3 je  $f(3) = 26$ , ale **vzorem** prvku 26 je množina  $\{-7, 3\}$ . Dále třeba vzorem prvku 0 je prázdná množina, což je totéž, co říci, že rovnice

$$x^2 + 4x + 5 = 0$$

nemá v  $\mathbb{R}$  řešení. Tradiční zápis  $f$  jako relace by vypadal

$$f = \{(x, x^2 + 4x + 5) \mid x \in \mathbb{R}\} \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}.$$

Bohužel následuje ještě poslední kus názvosloví, protože pro určité „zajímavé“ typy zobrazení máme zvláštní názvy.

**Definice 2.5.2.** Zobrazení  $f : A \rightarrow B$  nazveme

- **prosté** (nebo **injektivní**), pokud se každé dva *různé* prvky v  $A$  zobrazují na dva *různé* prvky v  $B$ . Formálně, zobrazení  $f$  je prosté, když

$$f(x) = f(x') \Rightarrow x = x' \quad \forall x, x' \in A.$$

Ještě jinak řečeno, zobrazení je prosté, když vzorem každého prvku je buď prázdná nebo jednoprvková množina. Fakt, že  $f$  je prosté, často zapisujeme jako  $f : A \hookrightarrow B$ .

- **na** (nebo **surjektivní**), když má každý prvek z  $B$  nějaký vzor v  $A$ . Formálně, zobrazení je na, když

$$\forall y \in B \exists x \in A : f(x) = y.$$

Ještě jinak řečeno, zobrazení je na, když je vzor každého prvku neprázdná množina. Fakt, že  $f$  je na, často symbolicky zapisujeme jako  $f : A \twoheadrightarrow B$ .

- **vzájemně jednoznačné** (nebo **bijektivní**), když je *prosté* a *na*, čili vzorem každého prvku je přesně jednoprvková množina. Fakt, že  $f$  je bijekce, často zapisujeme jako  $f : A \leftrightarrow B$  nebo  $f : A \cong B$ .

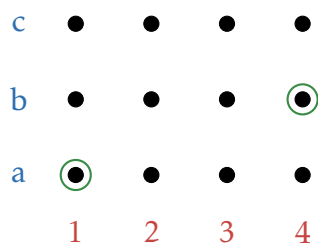
### Příklad.

- Zobrazení  $f : \mathbb{R} \leftrightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 2x + 3$  je **bijektivní**. Obecně, každá lineární funkce je bijektivní zobrazení. Důkaz je ponechán jako cvičení.
- Zobrazení  $f : \mathbb{R} \hookrightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 3/x$  je **prosté**, ale není na. To proto, že  $f^{-1}(0) = \emptyset$ .
- Zobrazení  $f : \mathbb{R} \twoheadrightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (x-2)(x-3)(x+1)$  je **na**, ale není prosté.

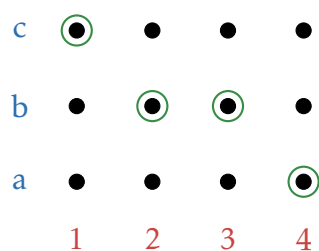
Třeba  $f^{-1}(0) = \{-1, 2, 3\}$ .

- Zobrazení  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 1 + 2/(x^2 - 1)$  není ani prosté, ani na. Například  $f^{-1}(5/3) = \{-2, 2\}$  a  $f^{-1}(1) = \emptyset$ .

Prostá, surjektivní i bijektivní zobrazení mezi konečnými množinami z jejich mříží poznáte velmi snadno. Prostá zobrazení mají v řádcích maximálně jeden prvek; surjektivní zobrazení mají v každém řádku aspoň jeden prvek; ta bijektivní mají v každém řádku přesně jeden prvek. Pár obrázků.



Obrázek 11: Mříž **prostého** zobrazení  $f := \{(1, a), (4, b)\}$ .



Obrázek 12: Mříž **surjektivního** zobrazení  $f := \{(1, c), (2, b), (3, b), (4, a)\}$ .

**Bijekce mezi množinami, které mají různý počet prvků existovat nemůže.** Důkaz si zkusíte za cvičení. Částečně ho ale dává následující slibovaná definice velikosti množiny pomocí bijektivních zobrazení.

**Definice 2.5.3 (Velikost množiny pořádně).** Pro přirozené číslo  $n \in \mathbb{N}$  označíme symbolem  $[n]$  množinu všech přirozených čísel od 1 až do  $n$  včetně. Čili,

$$[n] := \{1, 2, \dots, n\}.$$

Množinu  $A$  nazveme **konečnou**, pokud existuje přirozené číslo  $n \in \mathbb{N}$  a bijekce  $f : [n] \cong A$ . V takovém případě číslu  $n$  říkáme **velikost** množiny  $A$  a značíme  $\#A := n$ .

Bijekci  $f : [n] \cong A$  z [definice nahoře](#) můžeme vnímat jako „očíslování“ prvků množiny  $A$  čísly od 1 do  $n$ . Takových očíslování je samozřejmě mnoho. Kolik?

**Příklad.** Množina  $B := \{a, b, c\}$  má tři prvky. Jedna z možných bijekcí  $f : [3] \cong B$  je

$$f := \{(1, c), (2, a), (3, b)\}.$$

Posledním důležitým konceptem je pojem *inverzního zobrazení*. Intuitivně, a vlastně i formálně, inverzní zobrazení je zobrazení, které jde opačným směrem a obrazy posílá zpátky na vzory. Toto samozřejmě vyžaduje například, aby vzor byl vždy nejvýše jeden. Detaily si rozmyslíte jako cvičení.

**Definice 2.5.4 (Inverzní zobrazení).** Necht  $f : A \rightarrow B$  je zobrazení. **Inverzním zobrazením** k  $f$ , značeným dost nevhodně  $f^{-1}$ , nazveme zob-

razení  $B \rightarrow A$  splňující

$$f^{-1}(f(x)) = x \wedge f(f^{-1}(y)) = y \quad \forall x \in A, y \in \text{im } f.$$

Pozor! Inverzní zobrazení *nemusí existovat*.

**Výstraha.** Pokud k  $f : A \rightarrow B$  existuje inverzní zobrazení, značí  $f^{-1}(y)$  jak množinu vzorů prvku  $y \in B$ , tak obraz prvku  $y$  při inverzním zobrazení.

Toto však je problém pouze formální. Pokud totiž existuje inverzní zobrazení, pak má množina  $f^{-1}(y)$  buď jeden prvek, nebo žádný. V prvním případě tedy akorát ztotožňuji jednoprvkovou množinu s jejím jediným prvkem. To je totéž, co považovat třeba množinu  $\{2\}$  a číslo 2 za to samé. Vskutku, problém pouze formální, bez praktických důsledků.

Sekci završíme ku radosti všech párem cvičení.

**Cvičení 2.5.1.** Vyřešte následující úlohy rozprostřené po sekci. Konkrétně,

- dokažte, že mezi dvěma konečnými množinami různé velikosti neexistuje žádná bijekce.
- pro množinu  $A$  velikosti  $n$  určete počet různých bijektivních zobrazení  $f : [n] \cong A$ .
- určete, jakou podmínku splňují zobrazení  $f : A \rightarrow B$ , ke kterým existuje zobrazení inverzní.

**Cvičení 2.5.2.** Dokažte, že každá lineární funkce  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , tedy funkce daná předpisem

$$f(x) = ax + b \quad \text{pro } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$

je bijektivní zobrazení.

**Cvičení 2.5.3.** Nechť  $A$  je konečná množina. Zformulujte důkaz, že zobrazení  $f : A \rightarrow A$ , které je definované pro každé  $x \in A$ , je **prosté, právě tehdy když je na**.

Tento fakt se často též používá v teorii množin jako definice konečné množiny. Je hezčí než naše v tom, že nespolehá na množinu přirozených čísel. Tedy, množinu  $A$  nazvu *konečnou*, když každé zobrazení  $f : A \rightarrow A$  definované všude je prosté, právě tehdy když je na.

**Cvičení 2.5.4.** Najděte příklad zobrazení  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  definovaného na celém  $\mathbb{N}$ , které je

- (1) prosté, ale není na.
- (2) na, ale není prosté.

## 2.6 Uspořádání

Uspořádání je poslední v jistém smyslu speciální relací, na kterou se podíváme. Podobně jako ekvivalence, uspořádání mezi dvěma množinami nedává úplně smysl, takže se po celou sekci budeme soustředit na relaci na množině.

Určitě nejznámějším typem uspořádání je relace „menší nebo rovno“ (nebo „menší“, „větší nebo rovno“ atd., to je jedno), kterou jistě všichni známe. Tohle je ten příklad uspořádání, který doporučujeme mít na paměti, kdykoli se zdají obecné definice těžko stravitelnými.

Existuje ale samozřejmě spousta jiných druhů uspořádání s rozlišnými spektry užitku. Uveďme například uspořádání dělitelností, zcela zásadní v elementární teorii čísel, nebo lexikografické uspořádání, kterým se řadí slova ve slovnících a encyklopediích a dá se použít i pro řazení polynomů (například v důkazu slavného Gaussova algoritmu).

Ještě před definicí uspořádání se ale musíme zmínit o pro ni klíčové vlastnosti relací.

**Definice 2.6.1 (Antisymetrická relace).** Relace  $R$  na množině  $A$  se nazývá

- **antisymetrická**, pokud  $(x, y) \in R \Rightarrow (y, x) \notin R$  pro všechny prvky  $x, y \in A$ .
- **slabě antisymetrická**, pokud  $xRy \wedge yRx \Rightarrow x = y$  pro všechna  $x, y \in A$ .

Jak název napovídá, vlastnost antisymetrie je opravdu jakýmsi protikladem symetrie.

Přeložena do jazyka aspoň některých lidí, relace je (silně) antisymetrická tehdy, když to, že je prvek  $x$  v relaci s prvkem  $y$ , zakazuje, aby byl zároveň  $y$  v relaci s  $x$ . Může se však samozřejmě stát, že  $x$  není v relaci s  $y$  ani  $y$  není v relaci s  $x$ . Všimněte si, že vlastnost antisymetrie mimo jiné *nedovoluje*, aby daná relace byla reflexivní.



**Příklad.** Všeobecně oblíbených příkladem (silně) antisymetrické relace je relace  $<$ , třeba na množině  $\mathbb{R}$ . V moment, kdy pro dvě reálná čísla  $x, y \in \mathbb{R}$  platí, že  $x < y$ , pak automaticky **nemůže platit**  $y < x$ . Zároveň, žádné reálné číslo není nikdy ostře menší než ono samo, tedy  $<$  je vskutku antisymetrická a není reflexivní.

Ačkoliv to možná z definice není zřejmé, vlastnost *slabé* antisymetrie je opravdu jen oslabená vlastnost (silné) antisymetrie v tom smyslu, že slabě antisymetrická relace může být reflexivní. Čili, mám-li slabě antisymetrickou relaci  $R$ , pak  $xRy$  nutně **nezakazuje**, aby  $yRx$ , ale jediný prvek  $y$ , pro který tato situace může nastat, je  $x$  samotné.

**Příklad.** Asi tušíte, co přijde. Když vám řekneme, abyste zeslabili vztah  $<$ , prvním takovým přirozeným nápadem je vztah  $\leq$ , což je skutečně slabě antisymetrická relace. Vskutku, když  $x \leq y$ , pak se může stát, že i  $y \leq x$ , ale to nutně znamená, že  $x = y$ .

**Definice 2.6.2 (Uspořádání).** Relace  $R$  na množině  $A$  se nazývá

- (neostré) **uspořádání**, pokud je *reflexivní, slabě antisymetrická a transitivní*.
- **ostré uspořádání**, pokud je *antisymetrická a transitivní*.

Pokud je  $R$  (ostré) uspořádání na  $A$ , nazýváme dvojici  $(A, R)$  (ostře) **uspořádanou množinou**.

**Příklad.**

(1) Relace  $<$  na  $\mathbb{R}$  je **ostré uspořádání**, protože

- (antisymetrie)  $x < y \Rightarrow y \not< x$  a
- (transitivita)  $x < y \wedge y < z \Rightarrow x < z$

pro všechna čísla  $x, y, z \in \mathbb{R}$ .

(2) Relace  $\leq$  na  $\mathbb{R}$  je (neostré) **uspořádání**. Vskutku, platí

- (reflexivita)  $x \leq x$ ,

- (slabá antisymetrie)  $x \leq y \wedge y \leq x \Rightarrow x = y$  a
  - (transitivita)  $x \leq y \wedge y \leq z \Rightarrow x \leq z$
- pro všechna  $x, y, z \in \mathbb{R}$ .

Ještě poslední sousto nomenklatury.

**Definice 2.6.3 (Lineární uspořádání).** (Ostré) uspořádání  $R$  na množině  $A$  nazveme **lineárním**, pokud pro každé dva prvky  $x, y \in A$  platí, že  $xRy$  nebo  $yRx$ . Čili, každé dva prvky  $A$  spolu lze porovnat prostřednictvím  $R$ . (Ostré) uspořádání, které *není* lineární, často označujeme jako **částečné**.

**Příklad.** Jak  $<$ , tak  $\leq$ , jsou lineární uspořádání.

Protože základní idea za pojmem „uspořádání“ je, no, uspořádání prvků na množině, ujaly se pro jejich kreslení, spíše než mříže nebo šipky, tzv. *Hasseho diagramy*. Hasseho diagram vypadá tak, že prvky množiny jsou značeny tečkami a mezi porovnatelnými prvky (tj. prvky, které jsou v relaci) se dá dostat po úsečkách (někdy přes více prvků). Navíc, prvky se kreslí zezdola nahoru vzhledem k jejich pozici v rámci daného uspořádání.

**Příklad (Uspořádání velikostí).** Již jsme zpozorovali, že  $\leq$  je uspořádání. Jeho Hasseho diagram na množině  $A := \{1, 2, 3, 4, 5\}$  vidíte na [obrázku 13](#).

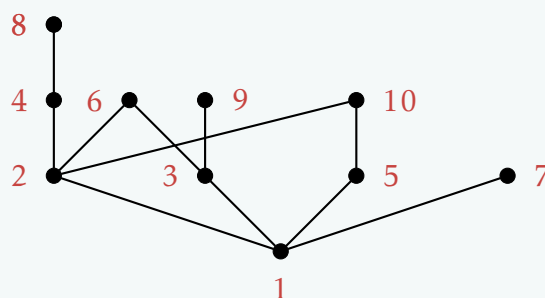


Obrázek 13: Hasseho diagram uspořádané množiny  $(A, \leq)$ .

Ve skutečnosti, Hasseho diagram **každého** lineárního uspořádání vypadá takto; liší se pouze počet prvků. Details si rozmyslíte za cvičení.

**Definice 2.6.4 (Dělitelnost).** Mějme čísla  $m, n \in \mathbb{N}$ . Říkáme, že  $m$  **dělí**  $n$ , když existuje přirozené číslo  $k \in \mathbb{N}$  takové, že  $n = km$ . Tento fakt zapisujeme jako  $m \mid n$ .

**Příklad (Uspořádání dělitelností).** Relace  $\mid$  z [definice dělitelnosti](#) je ve skutečnosti uspořádání (důkaz jako cvičení), které **ale není lineární**. Jeho [Hasseho diagram](#) na množině  $A := [10]$  je výrazně košatější.



Obrázek 14: Hasseho diagram uspořádané množiny  $(A, \mid)$ .

Lexikografické uspořádání je v principu uspořádání na slovech, ale může být úspěšně použito třeba i pro uspořádání polynomů více proměnných. Funguje následovně: slovem délky  $n$  nazveme posloupnost  $a_1 a_2 \dots a_n$ , kde  $a_i$  je libovolné písmeno mezi „a“ a „z“. Slovo  $a_1 a_2 \dots a_n$  je lexikograficky níž než slovo  $b_1 b_2 \dots b_m$ , pokud existuje  $i \leq \min(n, m)$  takové, že  $a_1 = b_1 \wedge a_2 = b_2 \wedge \dots \wedge a_{i-1} = b_{i-1}$  a  $b_i > a_i$ .

Řečeno lidsky, o slově  $a_1 a_2 \dots a_n$  řeknu, že je níž než  $b_1 b_2 \dots b_m$ , když nějaké jeho písmeno  $a_i$  je dřív v abecedě než písmeno  $b_i$  na stejném místě ve slově  $b_1 b_2 \dots b_m$ . Pokud je jedno slovo plně součástí druhého, lexikograficky níž je to kratší. Lexikografické uspořádání se obvykle značí rovněž  $\leq$ , ale pro přehlednost ho budeme značit třeba  $\leq_{\text{lex}}$ .

**Příklad (Lexikografické uspořádání).** Jak si můžete ověřit (ale cvičení to nutně není), lexikografické uspořádání je lineární, takže jeho Has-

seho diagram není dvakrát zajímavý. Pro úplnost zde ale přesto ukážeme [diagram](#) množiny

$$A := \{a_1 a_2 \mid a_i \in \{a, b, c\}\},$$

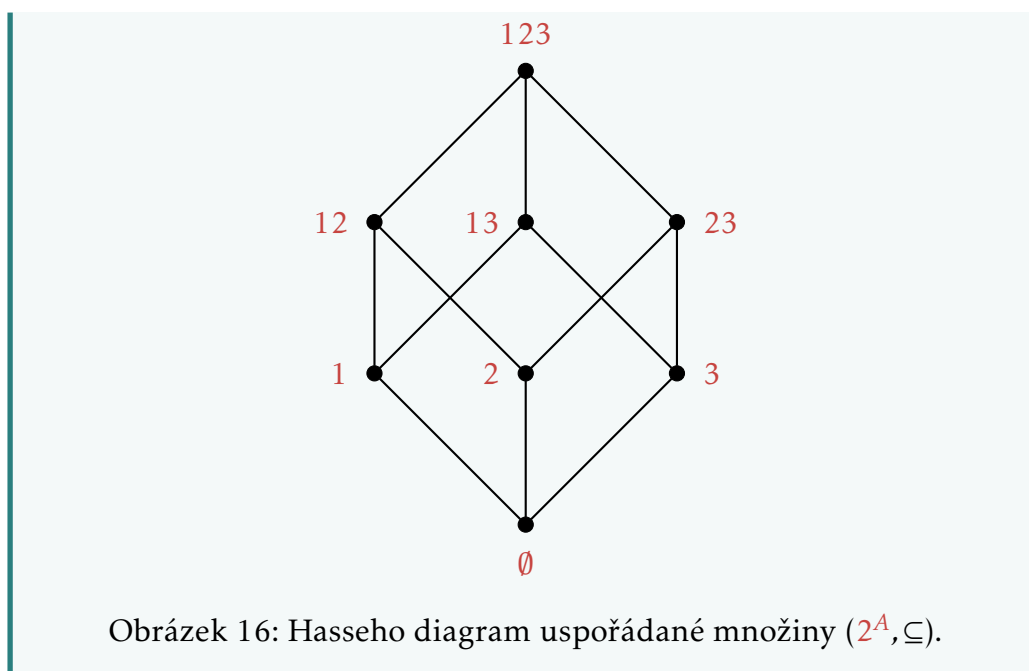
tedy množiny všech dvojpísmenných kombinací písmen „a“ až „c“.



Obrázek 15: Hasseho diagram uspořádané množiny  $(A, \leq_{\text{lex}})$ .

Velmi pěkné obrázky uspořádání vznikají i na množině všech množin  $A$ , tedy na  $2^A$ , kde uspořádání je inkluzí  $\subseteq$ . Tedy, nejniž je prázdná množina, která leží uvnitř každé množiny, a nejvýš je množina  $A$ , ve které je obsažena každá její podmnožina. Jeden malý příklad tu nakreslíme, určitě se vám bude líbit.

**Příklad.** Mějme množinu  $A := \{1, 2, 3\}$ . Množinu  $2^A$  uspořádáme inkluzí, čili dvě podmnožiny  $A$  jsou v relaci inkluze, když je jedna obsažena v druhé. Jeden příklad za všechny je třeba  $\{1\} \subseteq \{1, 3\}$ . [Hasseho diagram](#) takového uspořádání vidíte níže. V rámci úspory píšeme třeba 12 místo množiny  $\{1, 2\}$ .



Jako obvykle následuje několik cvičení na závěr sekce.

**Cvičení 2.6.1.** Udělejte cvičení rozmístěná po sekci. Konkrétně,

- (1) dokažte, že Hasseho diagram každého lineárního uspořádání má stejný tvar jako diagram na [obrázku 13](#).
- (2) dokažte, že relace dělitelnosti  $|$  je uspořádání na každé podmnožině přirozených čísel.

**Cvičení 2.6.2.** Explicitně popište všechny relace (na libovolné množině), které jsou zároveň ekvivalencí a (částečným) uspořádáním.

**Cvičení 2.6.3.** Řekněme, že  $R$  a  $S$  jsou uspořádání na množině  $A$ . Které z následujících relací jsou také uspořádáními na  $A$ ?

- $R \cap S$
- $R \cup S$
- $R \setminus S$
- $R \circ S$

## 2.7 Matematická indukce

Indukce je základní důkazovou technikou v diskretní matematice. Je to jeden možný, ale zcela jistě nejoblíbenější, způsob, jak dokazovat libovolná tvrzení o přirozených číslech, která jsou vlastně právě tím číselným oborem, který studuje diskretní matematika.

Princip indukce spočívá v tom, že přirozená čísla jsou definována v zásadě velmi jednoduše. Libovolná množina, která má nějaký „základní prvek“ (třeba jedničku) a spolu s každým prvkem má i jeho bezprostředního následníka (třeba to číslo o jedna větší), je automaticky „ta samá množina“ jako přirozená čísla.

Pokud byste měli chuť se podívat na formální definici přirozených čísel a dalších souvisejících věcí, doporučujeme vyhledat klíčová slova *Peanova aritmetika*, která je vlastně (možná kecám, ale myslím, že nejmenším možným) systémem axiomů (kategoricky platných výroků), jenž buduje ryze logický základ pro aritmetiku.

My si ale vystačíme s následujícím zjednodušením.

**Tvrzení 2.7.1** (Definice přirozených čísel). Necht  $A$  je množina, která splňuje, že

- $1 \in A$ ,
- je-li  $n \in A$ , pak rovněž  $n + 1 \in A$ .

Potom  $A = \mathbb{N}$ .

**Důkaz.** Nedokazuje se, je to axiom (konkrétně pátý) Peanovy aritmetiky.  $\square$

Žádáme, abyste si dali chvíli a zamysleli nad významem tvrzení. Zevrubně řečeno říká, že, pokud umím dokázat, že

- tvrzení platí pro první přirozené číslo a
- za předpokladu, že tvrzení platí pro  $n$ , platí pro  $n + 1$ ,

pak dané tvrzení platí pro všechna přirozená čísla. Tyhle dva důkazy totiž

dohromady dávají následující (nekonečný) řetězec důkazů:

- (1) (Nějaké) tvrzení platí pro  $n = 1$ .
- (2) Jestliže tvrzení platí pro  $n = 1$ , pak platí pro  $n = 2$ .
- (3) Jestliže tvrzení platí pro  $n = 2$ , pak platí pro  $n = 3$ .
- $\vdots$

Princip indukce asi není přehnaně složitý, ale získat dostatek zkušenosti, aby jej člověk uměl neomylně aplikovat, je výrazně obtížnější. Pár příkladů snad s tímto krokem pomůže. Budeme je záměrně formulovat jako lemmata či tvrzení, jelikož indukce je v první řadě důkazová technika. Doporučujeme, abyste důkazy četli se zvýšenou pozorností.

**Lemma 2.7.2.** Pro každé  $n \in \mathbb{N}$  platí

$$\sum_{i=0}^n 2^i = 2^{n+1} - 1.$$

**Důkaz.** Dokazujeme indukcí. Protože suma začíná od 0, je prvním prvkem, pro který musí tvrzení platit, v tomto případě právě  $n = 0$ . Dosazením zjistíme, že

$$\sum_{i=0}^0 2^i = 2^0 = 1 = 2^{0+1} - 1$$

tedy tvrzení platí pro  $n = 0$ . Předpokládáme, že tvrzení platí pro všechna přirozená čísla až do nějakého  $n \in \mathbb{N}$  a z tohoto předpokladu odvodíme, že platí i pro  $n + 1$ . Počítáme

$$\sum_{i=0}^{n+1} 2^i = \sum_{i=0}^n 2^i + 2^{n+1}.$$

Ovšem, z předpokladu dostaneme

$$\sum_{i=0}^n 2^i = 2^{n+1} - 1,$$

což dohromady s předchozím výpočtem dává

$$\sum_{i=0}^{n+1} 2^i = \sum_{i=0}^n 2^i + 2^{n+1} = 2^{n+1} - 1 + 2^{n+1} = 2 \cdot 2^{n+1} - 1 = 2^{n+2} - 1,$$

jak jsme chtěli ukázat. Důkaz je podle principu indukce ukončen.  $\square$

**Lemma 2.7.3.** Pro všechna  $n \in \mathbb{N}$  platí, že

$$3 \mid n \Rightarrow 3 \mid n^2,$$

tedy, pokud 3 dělí  $n$ , pak 3 dělí  $n^2$ .

Tady by se jistě leckdo rád odvolal třeba na prvočíselné rozklady. Je ale dobré si uvědomit, že fakt, že každé přirozené číslo má jednoznačný rozklad na prvočísla, není samozřejmý. Ve skutečnosti zabere určitou práci toto dokázat. Či vy jste viděli nějaký přímočarý důkaz, že jdou čísla rozkládat na prvočísla? Opravdu lze *každé* číslo rozložit na prvočísla a opravdu to lze *pouze jedním způsobem*?

**Důkaz (lemmatu 2.7.3).** Dokazujeme indukcí.

První přirozené číslo, pro které má smysl tvrzení dokázat, je  $n = 3$ . Pak vskutku  $3 \mid n = 3$  a  $3 \mid n^2 = 9$ .

Předpokládejme, že výrok  $3 \mid n \Rightarrow 3 \mid n^2$  platí pro nějaké  $n \in \mathbb{N}$ . Nejbližší další přirozené číslo po  $n$ , které je dělitelné 3, je  $n+3$ . Tedy, víme, že když  $3 \mid n$ , pak  $3 \mid n+3$  a také  $3 \mid n^2$ . Z těchto dvou faktů odvodíme, že  $3 \mid (n+3)^2$ .

Máme  $(n+3)^2 = n^2 + 6n + 9$ . Protože  $3 \mid 6$  a  $3 \mid 9$ , také  $3 \mid 6n + 9$ . Předpokládáme, že  $3 \mid n^2$ , dohromady tudíž  $3 \mid n^2 + 6n + 9 = (n+3)^2$ , jak jsme chtěli.  $\square$

Tři cvičení nakonec.



**Cvičení 2.7.1.** Dokažte indukcí, že

$$\sum_{i=1}^n i2^i = (n-1)2^{n+1} + 2.$$

**Cvičení 2.7.2** (Fibonacciho čísla a zlatý řez). Tak zvaná *Fibonacciho* posloupnost je definována tak, že další člen dostanu jako součet dvou předchozích. Formálně,  $F_0 = 0, F_1 = 1$  a  $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ , kde  $n \in \mathbb{N}$ . Dokažte indukcí, že

$$F_n \leq \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1}$$

pro všechna  $n \geq 0$ .

Číslo  $(1 + \sqrt{5})/2$  se někdy říká hodnota „zlatého řezu“ (protože je to v jistém smyslu *ideální* poměr mezi délkami dvěma bezprostředních úseček – internet poví víc). Jestli si někdy ukážeme limity, pak dokážeme tento výsledek zdokonalit v tom smyslu, že platí

$$\frac{F_n}{F_{n-1}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \sqrt{5}}{2}.$$

**Cvičení 2.7.3.** Nakresleme  $n$  přímek v rovině, a to tak, že

- žádné 2 nejsou rovnoběžné a
- žádné 3 se neprotínají v jednom bodě.

Dokažte indukcí, že takhle nakreslené přímky rozdělují rovinu na  $n(n+1)/2 + 1$  částí.

### 3 Počítání

V této kapitole se naučíme počítat; a ne, doteď jste to neuměli. Snad všechny potěšíme, když zvěstíme, že tahle je kapitola je již skutečným úvodem do problematiky *diskrétní matematiky*. Otázky typů „Kolik je čeho?“, „Kolik způsobů mohu něco udělat?“ skutečně nikam jinem patřit ani nemohou, protože analytici mají všeho nespočetně mnoho a lineárním algebraikům zas může vadit, že nad přirozenými čísly se žádná rozumná geometrie úplně dělat nedá.

Začneme snad jednoduchým počítáním daných typů zobrazení a podmnožin, poté se posuneme k počtu možností, jak za sebe skládat prvky. V neposlední řadě se budeme věnovat tzv. *principu inkluze a exkluze*, jenž umožňuje elegantně odpovídat třeba na otázky „Kolik je čísel menších než 100, které nejsou dělitelné 2 ani 3?“. Vše završíme notoricky známým *problémem šatnářky*, o kterém raději nic neprozradíme, bychom si udrželi alespoň přirozené číslo čtenářů.

Ty nejzákladnější způsoby, jak určovat počty věcí nebo způsobů, jak něco dělat, jsou obecně dva:

- **přímý** aneb „Vím, co dělám, a umím to spočítat pro libovolné přirozené číslo.“ a
- **indukcí** aneb „Vůbec to nechápu, ale zkusím si to pro pár malejších čísel a pak to nějak ukoulím i pro ty velké.“

Ačkoli by to kolegové z katedry kombinatoriky neradi slyšeli, druhý způsob je zcela jistě ten bohatě nejoblíbenější.

V trochu serióznějším duchu radíme vždy zkusit nejprve přímý důkaz, u kterého je zřejmé, jak jste na vzorec přišli a proč je správný. Důkaz indukci je totiž z principu *nekonstruktivní*, tj. není z něj vůbec jasné, odkud se vzorec bere. Stačí totiž jen ukázat, že funguje pro jakési první číslo a že když funguje pro nějaké číslo, pak funguje i pro to další. Takový důkaz ale neposkytuje vůbec žádný vhled do problému.

### 3.1 Zobrazení a podmnožiny

Chvíli se budeme bavit počítáním zobrazení a podmnožin obvykle určených nějakou hezkou podmínkou. Začít právě tady je vhodné z páru důvodů. Zaprvé, není potřeba vymýšlet žádnou novou teorii a zadruhé – snad trochu překvapivě – umět počítat zobrazení a podmnožiny se hodí do spousty dalších matematických disciplín. Zmiňme Čínskou větu o zbytcích, v podstatě jeden ze základních stavebních kamenů teorie čísel, jejíž důkaz je založen právě na tom, že umíme počítat zobrazení mezi množinami. Dále je tu třeba Burnsideova věta z abstraktní algebry, na jejíž pravdivost spoléhá třeba otáčení obsahu obrazovky na mobilech a jejíž důkaz vyžaduje porovnávání velikostí systémů podmnožin. Konečně, patří sem i latinské čtverce – struktury, jejichž princip stojí za vznikem Sudoku.

Pojďme začít tím nejjednodušším možným tvrzením, tedy o počtu všech zobrazení mezi množinami. Ukážeme si dva důkazy: jeden přímý a jeden indukci.

**Výstraha.** Pro stručnost budu v celé kapitole slovem zobrazení myslet **zobrazení definované všude**. Diskrétní matematiku totiž pravdať úplně netrápí problémy definičních oborů, takže není žádná výhoda v tom uvažovat zobrazení, která nejsou definována pro všechny prvky svých domén.

**Tvrzení 3.1.1 (Počet všech zobrazení).** Mějme konečné množiny  $A$  a  $B$ . Počet všech zobrazení  $A \rightarrow B$  je  $\#B^{\#A}$ .

**Důkaz (tvrzení 3.1.1 přímo).** Rozmysleme si nejprve, kdy se dvě zobrazení  $f, g : A \rightarrow B$  liší. To je přeci tehdy, když existuje nějaký prvek  $a \in A$  takový, že  $f(a) \neq g(a)$ .

Jinak řečeno, každé zobrazení  $A \rightarrow B$  popíšu tak, že určím obrazy všech prvků z  $A$ . Kdykoli mám dvě zobrazení, jejichž obraz byt i jednoho prvku z  $A$  se neshoduje, pak jsou to různá zobrazení. Pro každý prvek z  $A$  mám přesně  $\#B$  prvků, na které ho mohu zobrazit, tedy mám celkem přesně  $\#B^{\#A}$  možností, jak zobrazit všechny prvky z  $A$  na prvky z  $B$ .  $\square$

**Důkaz** (tvrzení 3.1.1 indukcí). Dokážeme předchozí tvrzení užitím indukce podle velikosti množiny  $A$ .

Když je  $A$  prázdná, čili  $\#A = 0$ , pak mám právě jedno zobrazení  $A \rightarrow B$  – to, které nezobrazuje nic na nic. Čili mám vsutku  $\#B^{\#A} = \#B^0 = 1$  různých zobrazení  $A \rightarrow B$ .

Předpokládejme, že platí, že zobrazení z  $A$  do  $B$  je právě  $\#B^{\#A}$  a přidejme do množiny  $A$  jeden prvek, třeba  $x$ . Chceme ukázat, že všech zobrazení  $A \cup \{x\} \rightarrow B$  je  $\#B^{\#A+1}$ . Jeden způsob, jak to udělat, je podívat se kolika způsoby můžeme zobrazení  $A \rightarrow B$  „dodefinovat“ v  $x$ .

No,  $x$  přeci mohu zobrazit na jakýkoliv prvek z  $B$  a každá volba obrazu mi dává jiné zobrazení. Čili, z jednoho zobrazení  $A \rightarrow B$  mi vznikne právě  $\#B$  různých zobrazení  $A \cup \{x\} \rightarrow B$ . To ale znamená, že všech zobrazení  $A \cup \{x\} \rightarrow B$  je  $\#B$ -krát víc než zobrazení  $A \rightarrow B$ . Tedy jich je podle předpokladu

$$\#B^{\#A} \#B = \#B^{\#A+1}.$$

□

O něco těžší je počítat zobrazení  $A \rightarrow B$  omezených vlastností. Samozřejmě bychom si mohli navymýšlet libovolné podmínky, které naše zobrazení musí splňovat; třeba, že musí na každý prvek  $B$  zobrazit právě prvočíselný počet prvků z  $A$ . Zjistit počet všech takových zobrazení by jistě byla zajímavá úloha, ale asi ne příliš užitečná. Pojďme se soustředit na více obvyklé typy zobrazení.

**Tvrzení 3.1.2 (Počet prostých zobrazení).** Počet všech **prostých** zobrazení  $A \rightarrow B$  je

$$\prod_{i=0}^{\#A-1} \#B - i,$$

**Důkaz.** Předvedeme přímý důkaz. Důkaz indukci si zkusíte za cvičení.

Princip důkazu je podobný jako při počítání všech zobrazení  $A \rightarrow B$ . Zásadní rozdíl dle v tom, že na každý prvek z  $B$  lze zobrazit maximálně jeden prvek z  $A$ . Opět ale platí, že dva různé výběry obrazů prvků z  $A$  nám dávají dvě různá zobrazení. Stačí tedy spočítat, kolika způsoby si můžeme zvolit, kam se prvky  $A$  zobrazí.

Nu, první prvek z  $A$  můžeme zobrazit na  $\#B$  různých prvků z  $B$ . Pro ten druhý ovšem máme už jen  $\#B - 1$  možností, protože zobrazení musí být **prosté**, a tedy nelze druhý prvek zobrazit tam, kam ten první. Tenhle princip se opakuje. Pro třetí prvek už máme jen  $\#B - 2$  možných obrazů atd. Celkem, pro  $i$ -tý prvek z  $A$  máme jen  $\#B - i + 1$  míst, kam ho zobrazit.

Shrnuto, pro každý výběr obrazu prvního prvku máme už jen  $\#B - 1$  možných obrazů pro druhý prvek. Pro každý výběr obrazů prvních dvou prvků máme už jen  $\#B - 2$  možných obrazů pro třetí prvek. Takhle pokračujeme, dokud nedojdeme až k  $\#A$ -tému prvku, pro který nám zbývá  $\#B - \#A + 1$  nevyužitých prvků  $B$ . Sepsáno symbolicky, máme

$$\#B(\#B - 1)(\#B - 2) \cdots (\#B - \#A + 1) = \prod_{i=0}^{\#A-1} \#B - i$$

možností, jak zvolit obrazy všech prvků z  $A$  za daných podmínek. Tedy existuje právě tolik prostých zobrazení  $A \rightarrow B$ .  $\square$

Na konec sekce si ještě spočítáme nějaké podmnožiny. Už víme, že počet všech podmnožin  $A$  je  $2^{\#A}$ . Je to [Tvzení 2.2.2](#). Asi nejjednodušší další úlohou je počet všech podmnožin liché a sudé velikosti. Ček by si řek', že jich je fifty-fifty a měl by recht. Ukážeme si důkaz.

**Tvzení 3.1.3 (Počet podmnožin liché velikosti).** Všechny podmnožiny liché velikosti konečné množiny  $A$  je  $2^{\#A-1}$ .

**Důkaz.** Půjdeme na to trochu jinak. Víme ze [sekce o zobrazeních](#), že mezi konečnými množinami existuje bijekce jenom tehdy, když jsou stejně velké. Vyjměme z  $A$  nějaký fixní prvek, třeba  $a \in A$ . Množinu  $A \setminus \{a\}$  označíme  $\tilde{A}$ . Protože  $\tilde{A}$  má  $\#A - 1$  prvků, počet jejích podmnožin je  $2^{\#A-1}$ . Najdeme bijekci mezi všemi podmnožinami množiny  $\tilde{A}$  a lichými podmnožinami množiny  $A$ .

Definujme zobrazení  $f : 2^{\tilde{A}} \rightarrow 2^A$  následujícím způsobem. **Pozor! Všimněte si, že zobrazení  $f$  je definované na podmnožinách. Tedy zobrazuje množiny na množiny.**

Každá lichá podmnožina  $A$  buď obsahuje  $a$ , nebo je neobsahuje. Liché podmnožiny  $A$ , které obsahují  $a$ , jsou sudými podmnožinami  $\tilde{A}$  (pro-

tože jsme  $a$  odebrali), a ty, které  $a$  neobsahují, zůstávají lichými i v  $\tilde{A}$ . Tedy, definujme

$$f(X) := \begin{cases} X, & \text{pokud } \#X \text{ je liché,} \\ X \cup \{a\}, & \text{pokud } \#X \text{ je sudé.} \end{cases}$$

pro každou podmnožinu  $X \subseteq \tilde{A}$ . Tím jsme sestrojili bijekci mezi všemi podmnožinami  $\tilde{A}$  a lichými podmnožinami  $A$ . Odtud plyne, že lichých podmnožin  $A$  je  $2^{\#A-1} = 2^{\#A}/2$ .

Pro sudé podmnožiny lze postupovat obdobně anebo si uvědomit, že všechny ostatní podmnožiny, které nejsou liché, musejí být sudé. Tedy jich je  $2^{\#A} - 2^{\#A-1} = 2^{\#A-1}$ .  $\square$

Předchozí důkaz ilustruje další běžný způsob, jak počítat prvky daných množin: konkrétně tak, že najdeme bijekci mezi množinou, jejíž počet prvků chceme spočítat, a množinou, jejíž počet prvků známe.

Dvě cvičení na závěr.

**Cvičení 3.1.1.** Dokažte [Tvzení 3.1.2](#) indukcí podle velikosti množiny  $A$ .

**Cvičení 3.1.2.** Určete počet všech uspořádaných dvojic  $(A, B)$ , kde  $A \subseteq B \subseteq \{1, \dots, n\}$ .

*Uspořádaná dvojice* znamená, že  $(A, B) \neq (B, A)$ , tedy záleží na pořadí, v jakém podmnožiny zapíšu.

## 3.2 Permutace

Permutace jsou vlastně zobrazení, která prohazují prvky množin. Jejich asi hlavním účelem je formalizovat koncept, že „nezáleží na pořadí“ nebo naopak, že všechno dělám pro všechna možná přeuspořádání prvků. Člověk by měl dobrý důvod si myslet, že nejsou dobré k ničemu jinému, než ke zkrácení zápisu. Opak je pravdou. Permutace mají velmi překvapivé aplikace v oblastech matematiky, kde by je jeden nehledal. Zmínme tři příklady.

- Důkaz základní věty algebry – tvrzení, že každý komplexní polynom má komplexní kořen – silně využívá tzv. rozklad na symetrické polynomy, založený na vlastnostech permutací.
- Fakt, že kořeny obecných reálných (i komplexních) polynomů nelze zapsat v radikálech (tj. odmocninách), když je stupeň polynomu větší nebo roven 5 (tj. objevuje se v něm  $x^5$ ), se opírá o tzv. „neřešitelnost“ permutačních grup (množin permutací na dané množině s binární operací skládání).
- Důkaz, že na každé Riemannově pseudovarietě dimenze 4 (kterou fyzikové používají jako model časoprostoru) existuje nekonečně mnoho neisomorfních Riemannových metrik (tj. v našem vesmíru mohu měřit vzdálenost nekonečně mnoha neekvivalentními způsoby) staví na symetrii tensorů definovaných pomocí permutací.

Takže, o co tu vlastně jde.

**Definice 3.2.1 (Permutace).** Bijekce  $\sigma : X \rightarrow X$  konečné množiny  $X$  na sebe samu se nazývá *permutace* množiny  $X$ .

Množinu všech permutací na  $X$  značíme  $S_X$  (jako grupa symetrií  $X$ ).

Jelikož všichni rádi počítáme (xD), určíme si na začátek počet všech permutací na dané množině. Podle [cvičení 2.5.3](#), které jste *všichni* dělali, zobrazení na konečné množině  $X$  je prosté právě tehdy, když je na, tedy právě tehdy, když je bijektivní. Tento fakt nám pomůže s důkazem následujícího tvrzení. Jen ještě jedna definice usnadňující zápis.

**Definice 3.2.2 (Faktoriál).** Pro přirozené číslo  $n \in \mathbb{N}$  definujeme

$$n! := \prod_{i=0}^{n-1} n - i.$$

Výraz  $n!$  čteme  $n$  faktoriál.

**Tvrzení 3.2.3 (Počet permutací na množině).** Ať  $X$  je konečná množina. Pak  $\#S_X = (\#X)!$ .

**Důkaz.** Podle [tvrzení 3.1.2](#), počet prostých zobrazení  $A \rightarrow B$  je

$$\prod_{i=0}^{\#A-1} \#B - i.$$

Když  $A = B$ , pak bijekce  $A \rightarrow A$  jsou totéž, co prostá zobrazení  $A \rightarrow A$ . Tedy, všech bijekcí  $A \rightarrow A$  (tj. všech permutací na  $A$ ) je

$$\prod_{i=0}^{\#A-1} \#A - i = (\#A)!.$$

□

### 3.2.1 Zápis permutací

Budeme se chvíli bavit o tom, jak můžeme reprezentovat permutace. Samozřejmě, permutace jsou mimo jiné zobrazení, takže je lze kreslit, jak už jsme to dělali; tj. jako šipky mezi množinami teček.

Existují ale chytřejší a přehlednější způsoby, jak je znázornit. Jeden možný způsob je zápisem do řádku. Řekněme, že  $X = \{1, 2, 3, 4\}$  a  $\sigma \in S_X$ . Když napíšeme, že

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix},$$

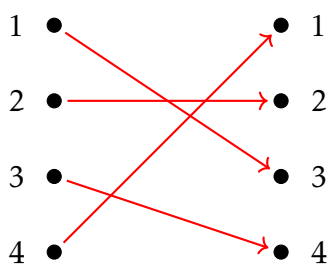
myslíme tím, že  $\sigma$  je zobrazení, které posílá 1 na 3, 2 na 2, 3 na 4 a 4 na 1. Můžeme navíc předpokládat, že vrchní řádek je vždycky v nějakém



předem dohodnutém pořadí a permutaci  $\sigma$  zapsat prostě jako

$$\sigma = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}.$$

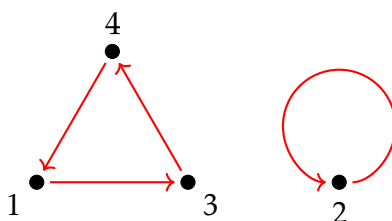
V obvyklém kreslení zobrazení bychom  $\sigma$  znázornili, kterak vidíte na [obrázku níže](#).



Obrázek 17: Permutace  $\sigma$  zakreslená šipkami.

Ačkoli je způsob zápisu do řádku intuitivní a podporuje představu permutace jako „proházení“ prvků na množině, mnohem více se používá tzv. zápis v cyklech. Důvody jsou primárně formální; z cyklického zápisu se velmi snadno totiž pozná jak „řád“ permutace, tak její rozložení na „transpozice“. Oba pojmy definujeme a vysvětlíme později.

Jelikož permutace jsou bijekce z množiny do téže množiny, můžeme vždy začít v nějakém libovolné prvku a pokračovat po šipkách, dokud se nedostaneme opět na ten samý prvek. Tento přístup formalizuje právě zápis do cyklů. Například zápis permutace  $\sigma = (3\ 2\ 4\ 1)$  do cyklů by vypadal takto:



Obrázek 18: Zápis permutace  $\sigma$  do cyklů.

Jak si asi dovedete představit, tento zápis znamená, že permutace  $\sigma$  pošle 1 na 3, pak 3 na 4 a nakonec 4 na 1. Tedy, po třech „iteracích“ permutace

$\sigma$  se dostaneme z prvku 1 opět do prvku 1. Smyčka nad 2 samozřejmě znamená, že 2 se zobrazuje opět na 2.

Zápis na [obrázku výše](#) je evidentně dosti neúsporný, a v textu tudíž těžko použitelný. Obvykle se taková permutace zapíše jako  $\sigma = (134)(2)$ . Tedy, jednotlivé cykly jsou odděleny závorkami a šipky v cyklech vedou zleva doprava, případně z posledního prvku zpět na první.

Konečně, smyčky (tj. zobrazení prvku na sebe sama) se z cyklického zápisu běžně vynechávají. Svoji oblíbenou permutaci  $\sigma = (134)(2)$  můžeme proto úplně nejúsporněji zapsat jako  $\sigma = (134)$ . Zápis permutací v cyklech budeme odteď využívat výhradně.

**Výstraha.** Zápis permutace pomocí cyklů **není jednoznačný**. Je to proto, že u daného cyklu nelze říct, kde „končí“ a kde „začíná“. Důležité je pouze vzájemné pořadí prvků. Permutace  $(134)$ ,  $(341)$  a  $(413)$  jsou tudíž jedna a ta samá.

### 3.2.2 Skládání permutací

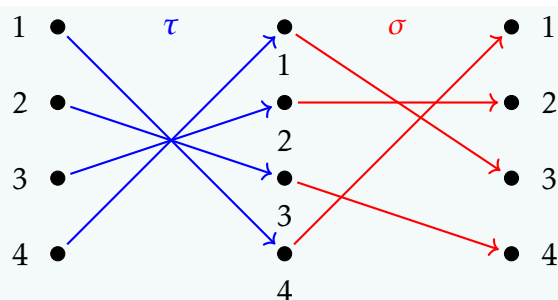
Jelikož permutace jsou speciálně zobrazení, dají se pochopitelně skládat. Navíc, protože doména i kodoména každé permutace na  $X$  je právě množina  $X$ , mohu je skládat v libovolném pořadí a libovolném množství.

Na výpočet složení dvou permutací  $\sigma, \tau \in S_X$  není myslím žádný vyloženě snadný postup. Člověk se musí zkrátka v cyklickém zápisu dočíst, kam posílá první permutace daný prvek a kam zase druhá permutace posílá obraz tohoto prvku.

**Příklad.** Ať  $X = \{1, 2, 3, 4\}$  a  $\sigma, \tau \in S_X$ ,  $\sigma = (134)$ ,  $\tau = (14)(23)$ . Pak

$$\sigma\tau = (243),$$

protože  $\tau$  pošle 1 na 4 a  $\sigma$  pošle 4 na 1, tedy  $\sigma\tau$  pošle 1 na 1. Podobně pro ostatní prvky. V šípkách složení  $\sigma\tau$  vypadá takto:



Obrázek 19: Složení permutací  $\sigma\tau$  znázorněno v šipkách.

Všimněte si ale, že

$$\tau\sigma = (123).$$

**Výstraha.** Jak bylo vidno z předchozího příkladu, skládání permutací (jako obecně i relací) **není komutativní**. Dokonce platí, že pouze skládání permutace se sebou samou je komutativní, čili jsou-li  $\sigma, \tau \in S_X$ , pak

$$\sigma\tau = \tau\sigma \Rightarrow \tau = \sigma$$

za předpokladu, že  $\#X \geq 3$ .

Nyní si konečně povíme, co znamená „řád“ permutace a že každou permutaci lze rozložit na „transpozice“.

Když  $\sigma = c_1 c_2 \cdots c_n$  je rozklad permutace  $\sigma \in S_X$  na cykly  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , pak *délkou cyklu*  $c_i$  myslíme počet prvků množiny  $X$ , které se v něm vyskytují. Tedy, např. délka cyklu (1324) je 4 a délka cyklu (457) je 3.

**Definice 3.2.4 (Transpozice).** Permutace  $\sigma \in S_X$  se nazývá *transpozice*, když obsahuje právě jeden cyklus délky 2. Lidsky řečeno, transpozice jsou přesně ty permutace, které prohazují dva prvky.

Možná trochu překvapivý výsledek ohledně permutací je, že každou permutaci lze napsat jako složení transpozic. Navíc je algoritmus velmi přímočarý – stačí zkrátka každý cyklus délky  $k$  rozložit na  $k - 1$  transpozic tak, že každý „vnitřní“ prvek cyklu zdvojíme. Zformulujeme si tvrzení a ukážeme si algoritmus na příkladě.

**Tvrzení 3.2.5 (Rozklad na transpozice).** Ať  $\sigma \in S_X$  a  $\#X \geq 2$  (jinak bychom neměli dva prvky k prohození). Pak existují transpozice  $\tau_1, \dots, \tau_n$  takové, že

$$\sigma = \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n.$$

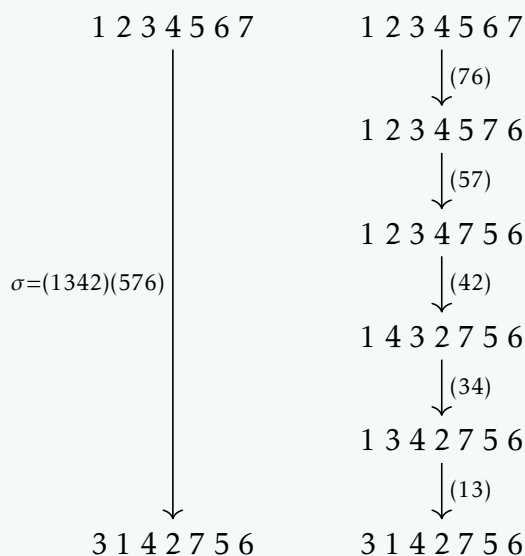
Navíc, počet transpozic v rozkladu  $\sigma$  je určen jednoznačně.

**Důkaz.** Formální. Vynechám. Ideu si ukážeme na příkladě.  $\square$

**Příklad.** Rozložíme permutaci  $\sigma = (1342)(576)$  na transpozice. Každý cyklus vlastně rozdělíme na cykly délky dva (což jsou vlastně transpozice) zdvojením každého vnitřního prvku. Tedy, cyklus (576) se rozdělí na transpozice (57) a (76) a cyklus (1342) se rozdělí na (13), (34) a (42). Pak dostaneme (**pozor na pořadí!**)

$$\sigma = (13) \circ (34) \circ (42) \circ (57) \circ (76),$$

což je rozklad  $\sigma$  na transpozice. Na [obrázku](#) vidíte znázornění aplikace permutace  $\sigma$  na množinu  $\{1, \dots, 7\}$  a postupnou aplikaci příslušných transpozic.



Obrázek 20: Znázornění rozkladu permutace  $\sigma$  na transpozice.

**Definice 3.2.6 (Sudá/lichá permutace).** Permutaci  $\sigma \in S_X$  nazveme *sudou*, když její rozklad na transpozice obsahuje sudý počet transpozic. Jinak ji nazveme *lichou*.

Poslední zajímavý výsledek o permutacích, který zmíníme, říká, že když jednu permutaci složím samu se sebou dostatečněkrát, dostanu identické zobrazení na  $X$ . Počtu složení se formálně říká „řád“ permutace.

**Definice 3.2.7 (Řád permutace).** Mějme  $\sigma \in S_X$ . Přirozené nenulové číslo  $k \in \mathbb{N}$  nazveme *řádem* permutace  $\sigma$ , když

$$\sigma^k = \mathbb{1}_X,$$

kde výrazem  $\sigma^k$  myslíme složení  $\sigma$  se sebou samou  $k$ -krát, tj.

$$\sigma^k := \underbrace{\sigma \circ \sigma \circ \cdots \circ \sigma}_{k\text{-krát}}.$$

Řád permutace  $\sigma$  značíme  $\text{ord } \sigma$  (z angl. **order**).

Na konec podsekcce si rozmyslíme, že každá permutace má konečný řád a jak ho počítat. Uvažme třeba permutaci  $\sigma = (143)$ . Tahle permutace posílá 1 na 4, 4 na 3 a 3 zpět na 1. To ovšem znamená, že když ji „zopakují“ třikrát za sebou, dostanu se rovnou z 1 na 1. Vskutku, můžete si ověřit, že

$$\sigma^3 = (143) \circ (143) \circ (143) = \mathbb{1}_{\{1,2,3,4\}}.$$

Tento pohled napovídá, že když cyklus délky  $k$  zopakují  $k$ -krát, zobrazím všechny prvky v tomto cyklu na ony samé.

Co když mám ale permutaci složenou z cyklů různých délek, jako třeba  $(143)(25)$ ? No, cyklus  $(143)$  musím zopakovat třikrát a cyklus  $(25)$  dvakrát. Když ale tuto permutaci třikrát zopakují, nedostanu identické zobrazení, protože cyklus  $(25)$  zopakovaný třikrát je zase  $(25)$ . Když se zamyslíme, zjistíme, že abych dostal z permutace identické zobrazení, musím ji opakovat právě tolikrát, kolik je nejmenší společný násobek délek jejích cyklů, aby se každý cyklus zopakoval nějakým násobkem své délky. Zformulujeme si tento fakt jako tvrzení, ale dokazovat ho nebudeme, protože důkaz je otravně formální a ideu jsme si právě řekli.

**Tvrzení 3.2.8 (O řádu permutace).** Ať  $\sigma \in S_X$  a

$$\sigma = c_1 c_2 \cdots c_n$$

je zápis  $\sigma$  v cyklech  $c_1, \dots, c_n$ . Označme  $d_i$  délku cyklu  $c_i$  pro každé  $i \leq n$ . Pak

$$\text{ord } \sigma = \text{lcm}(d_1, \dots, d_n),$$

kde lcm (z angl. **l**east **c**ommon **m**ultiple) značí nejmenší společný násobek.

Myslím, že tohle tvrzení je pěkným příkladem přirozeného avšak poměrně silného tvrzení. Kdybyste nevěděli nic o permutacích a řekl bych vám, že máte dokázat fakt, že když bijekci na konečné množině složím samu se sebou hodněkrát, dostanu identické zobrazení, asi byste se zapotili.

### 3.2.3 Problém sta vězňů

Za sedmero horami a sedmero řekami, byla nebyla kdysi jedna věznice, ve které bylo žilo a živořilo sto vězňů. Její dozorce, chor a zchřádl, matematik řemeslem a krutovládce povahou, jednoho jitra rozhodl, že vězně propustí – buď do světa, nebo až do toho příštího.

Vyklidiv vězeňskou jídelnu, postavil zde sto dřevěných stolic nesoucích sto papírových obálek. Mezi obálky rozloučil sto kamení, v každém toponě vyryto různé číslo od jedné do sta.

Rozkázav vězně seřaditi před jídelnu, přiřadil každému rovněž různé číslo od jedné do sta, v pořadí, kterak stáli. Vězni měli po řadě postoupit do jídelny a otevřít padesát obálek. Našli-liž mezi nimi kámen zračící jejich číslo, vrátili jej zpět a směli opustit jídelnu opačným východem.

Podmínka propuštění děla, že každý vězeň musí v jedné z padesáti obálek, které otevřel, uzříti své číslo. Pokud byť i jeden vězeň své číslo neobjevil, celé těleso vězňů bylo by kvapně popraveno.

Asi není těžké si rozmyslet, že tohle je úloha na permutace. Pořadí, v jakém jsou umístěny stolice, můžeme vnímat jako množinu přirozených čísel  $\{1, \dots, 100\}$  a rozmístění kamenů do obálek jako jednu její náhodně zvolenou permutaci. Tedy to, že v obálce číslo 6 je kámen s číslem 23, zna-

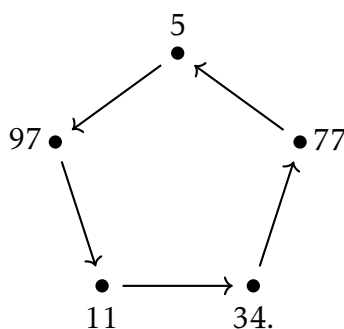
mená, že tato permutace posílá prvek 6 na prvek 23.

Pokud by vězni vybírali obálky k otevření náhodně, měl by každý z nich na nalezení kamene se svým číslem šanci přesně  $1/2$ . Protože tahle situace se má opakovat stokrát po sobě, šance, že všichni najdou tímto způsobem své číslo, je  $(1/2)^{100}$ , tedy 1 ku 1 267 650 600 228 229 401 496 703 205 376 – čili pořád větší, než že si MŠMT všimne, že existují počítače – ale přesto malá.

My tvrdíme, že ve skutečnosti existuje strategie, která umožní vězňům uniknout poslednímu dechu s šancí větší než 30 %. Navíc je velmi přímočará. Stačí, aby každý vězeň otevíral obálky v pořadí, které určují kameny v nich obsažené. Konkrétně, každý vězeň otevře jako první obálku na stoličce se stejným pořadím, jako je to jeho. Dál půjde otevřít obálku na stoličce s pořadím, které odpovídá číslu na kameni v obálce, kterou právě otevřel. Takhle pokračuje, dokud nenajde své číslo, nebo dokud neprojde padesát různých obálek.

Ilustrujme si postup na příkladě. Do jídelny vstoupí vězeň s číslem 11. Otevře obálku číslo 11 a najde v ní kámen s číslem 34. Dále otevře obálku s číslem 34, v níž je číslo 77. Ještě jednou, v obálce číslo 77 najde číslo 5. V obálce číslo 5 najde kámen s číslem 97. A nakonec – Ejhle! – v obálce číslo 97 najde kámen se svým číslem – 11.

Označme permutaci určenou čísly na kamenech v obálkách třeba  $\kappa$  (podle slova kámen). Situace v předchozím odstavci znamená, že v  $\kappa$  existuje cyklus



Nyní už si můžeme rozmyslet, za jaké podmínky objeví všichni vězni obálku s kamenem svého čísla. V moment, kdy vězeň otevře první obálku, dostane se tím do jednoho konkrétního cyklu permutace  $\kappa$ . Podle dané

strategie bude tento cyklus sledovat až do konce (když „začátkem“ cyklu myslíme číslo vězně). Pokud je délka daného cyklu třeba  $d$ , pak v moment, kdy otevře tento vězeň  $d$ -tou obálku, bude v ní kámen s jeho číslem. Samozřejmě, podmínka propuštění říkala, že každý vězeň smí otevřít maximálně 50 obálek. Protože každý vězeň má přiřazeno jiné, určité čísla všech vězňů dohromady vyčerpají všechny cykly permutace  $\kappa$ . To znamená, že všichni vězni najdou svoje číslo tímto postupem jedině v případě, **kdy permutace  $\kappa$  neobsahuje cyklus délky větší než 50**. Zformulujeme si to jako pozorování.

**Pozorování.** Problém sta vězňů má řešení (tedy všech sto vězňů bude propuštěno) právě tehdy, když permutace  $\kappa$ , určená čísla na kamelech v obálkách, neobsahuje cyklus délky větší než 50.

Abychom spočítali šanci vězňů na úspěch, zbývá nám umět spočítat počet všech takových permutací, tj. permutací s cykly délky maximálně 50.

Ať  $X := \{1, \dots, 100\}$ . Bude výhodnější řešit opačný problém, tedy hledat počet permutací s cyklem délky aspoň 51, protože (vzhledem k tomu, že množina  $X$  má 100 prvků), takový cyklus tam může být nejvýše jeden.

Ať  $C_n(S_X)$  značí počet všech permutací na  $X$  s aspoň jedním cyklem délky  $n$ . Jak jsme právě řekli, pro  $n \geq 51$  může mít libovolná permutace takový cyklus jenom jeden. Dále je zřejmé, že počet všech permutací s cyklem délky *aspoň* 51 spočtu tak, že sečtu počty permutací s cyklem délky  $n$  pro všechna  $n$  od 51 do 100. Když  $C_{\geq 51}(S_X)$  značí počet permutací s cyklem délky aspoň 51, máme

$$C_{\geq 51}(S_X) = \sum_{n=51}^{100} C_n(S_X).$$

Spočítáme  $C_n(S_X)$  pro  $n \geq 51$ . Abychom určili permutace s cyklem délky  $n$ , musíme zvolit  $n$  z těch 100 čísel, která se v cyklu objeví. Počet způsobů, jak zvolit  $n$  čísel ze 100 je  $\binom{100}{n}$  (vizte [sekcí o kombinačních číslech](#)). Čísla v tomto cyklu mohou být uspořádána  $n!$  způsoby. **Ovšem, pozor!** Nezapomeňte, že uvnitř cyklu mohou čísla posouvat a cyklus tím nechat stejný. Protože mám v cyklu  $n$  čísel, dělá to dohromady  $n$  možných posunutí. Tedy mám

$$\frac{\binom{100}{n} n!}{n} = \binom{100}{n} (n-1)!$$



různých způsobů, jak zvolit cyklus délky  $n$ .

Konečně, zbývající čísla (tedy ta mimo ten cyklus) můžu přeuspořádat  $(100 - n)!$  způsoby. Celkem, počet všech permutací s cyklem délky  $n$  pro  $n \geq 51$  je

$$C_n(S_X) = \binom{100}{n} (n-1)! (100-n)!.$$

Je na čase završit výpočet. Všechny možných permutací na 100 číslech je  $100!$ . Počet všech permutací s cyklem délky aspoň 51 je  $C_{\geq 51}(S_X)$ . Čili šance, že náhodně vybraná permutace na 100 číslech **obsahuje** cyklus délky větší než 50 je

$$\frac{C_{\geq 51}(S_X)}{100!} = \frac{\sum_{n=51}^{100} C_n(S_X)}{100!} = \frac{\sum_{n=51}^{100} \binom{100}{n} (n-1)! (100-n)!}{100!} \approx 0.688,$$

čili 68,8 %. To ovšem znamená, že šance, že náhodná permutace **neobsahuje** cyklus délky větší než 50 je přibližně  $1 - 0.688 = 0.312$ . Takže při využití této strategie mají vězni přibližně 31.2% šanci na přežití. O něco lepší než náhodné zkoušení.

**Cvičení 3.2.1.** Spočítejte složení  $\sigma\tau$  a  $\tau\sigma$ , když

- (1)  $\sigma = (143)(26), \tau = (146)(253),$
- (2)  $\sigma = (14)(25)(36), \tau = (123456),$
- (3)  $\sigma = (145)(263), \tau = (154)(236).$

**Cvičení 3.2.2.** Určete řád permutace  $\sigma$ , kde

- (1)  $\sigma = (1345),$
- (2)  $\sigma = (1346)(28)(579).$

**Cvičení 3.2.3 (těžké).** Určete číslo  $C_n(S_X)$ , kde  $\#X = 100$  a  $n \leq 50$ , tedy počet všech permutací na 100 číslech s aspoň jedním cyklem délky menší nebo rovné 50.

Samozřejmě jich je  $100! - C_{\geq 51}(S_X)$ , ale cílem úlohy je spočítat je nějak chytře, aby člověk dostal hezčí vzoreček.

**Cvičení 3.2.4.** Ať  $\sigma \in S_n$ , tedy  $\sigma$  je permutace množiny  $\{1, \dots, n\}$ . Řekneme, že  $\sigma$  *invertuje* dvojici  $(i, j)$ , kde  $i, j \in \{1, \dots, n\}$ , když  $i < j$ , ale  $\sigma(i) > \sigma(j)$ .

Definujme

$$I(\sigma) := \{(i, j) \in \{1, \dots, n\}^2 \mid \sigma \text{ invertuje } (i, j)\},$$

čili  $I(\sigma)$  je množina všech dvojic  $(i, j)$ , které  $\sigma$  invertuje. Uvědomme si, že  $I(\sigma)$  je podmnožinou  $\{1, \dots, n\}^2$ , čili relací na  $\{1, \dots, n\}$ .

- (1) Dokažte, že  $I(\sigma)$  je transitivní relace na  $\{1, \dots, n\}$  pro každou permutaci  $\sigma \in S_n$ .
- (2) \* Navrhněte algoritmus, který pro danou permutaci  $\sigma \in S_n$  spočte  $\#I(\sigma)$ .
- (3) Spočtěte počet invertovaných dvojic, čili  $\#I(\sigma)$ , permutací  $\sigma = (134)(579)(26)$ .

### 3.3 Kombinační čísla

V této sekci se budeme zabývat asi poměrně přirozenou otázkou – kolik má množina  $X$  podmnožin velikosti  $k$ , kde  $k$  může být libovolné číslo od 0 do  $\#X$ . Pro  $k = 0$  i  $k = \#X$  je odpověď jednoduchá: přesně jednu. Pro  $k = 1$  člověku hádám taky dojde, že jednoprvková podmnožina je vlastně totéž, co její jediný prvek, takže takových máme  $\#X$ . Od  $k = 2$  nám ale začíná, borcovia, prituhovat. Nejspíš bychom pořád zvládli počet dvouprvkových množin nějak zpatlat, ale co třeba  $k = \#X/2$  (když je  $\#X$  sudé) a podobné takřka nekřesťanské výmysly? To už chce nějaké udělátko.

Nejdřív si to ale, jakožto slušní a spořádaní matematikové, definujeme.

**Definice 3.3.1 (Počet  $k$ -prvkových podmnožin).** Ať  $X$  je množina a  $0 \leq k \leq \#X$  je přirozené číslo. Definujeme množinu

$$\binom{X}{k} := \{A \subseteq X \mid \#A = k\}$$

všech  $k$ -prvkových podmnožin množiny  $X$ . Výraz  $\binom{X}{k}$  čteme „ $X$  nad  $k$ “.

Chvilku se budeme bavit přemítáním o způsobu, jak spočítat  $\#\binom{X}{k}$  pro libovolné  $k$  mezi 0 a  $\#X$ .

Použijeme kombinatorickou metodu důkazu zvanou *počítání dvěma způsoby*. Jde o užitečný (a podle mého velmi elegantní) přístup ve chvíli, kdy neumím spočítat rovnou konkrétní množství, ale umím spočítat něco velmi podobného. Technika počítání dvěma způsoby spočívá v tom, že tu kvantitu, kterou spočítat *umím*, vyjádřím na jedné straně pomocí kvantity, kterou spočítat *neumím*, a na druhé straně pomocí vzorečku, který znám. To mi dá rovnici, ze které pak vyjádřím to číslo, které chci určit.

Takto abstraktně vám asi *počítání dvěma způsoby* nic neřeklo, takže je raději pojďme aplikovat na zpytovaný problém. Počet  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  spočítat neumím; což takhle začít tím, že si nějakou náhodnou podmnožinu  $\{x_1, \dots, x_k\} \subseteq X$  zvolím. Jeden z důvodů, proč neumím počet takovýchle podmnožin spočítat, je, že mi chybí nějaké *uspořádání*.

Zatím všechny věci, které jsme počítali, byly v jistém smyslu *uspořádané*.

Počet všech zobrazení  $A \rightarrow B$  jsme počítali tak, že jsme prvky  $A$  **jeden po druhém** zobrazovali na prvky  $B$ . Vlastně nevědomky jsme si tak nějakým náhodným způsobem *uspořádali* množinu  $A$ , aby se nám dobře počítalo. Permutace jsou taky přímo definované tak, že mění *uspořádání* prvků na množině.

Vybrat si nějaké uspořádání na  $X$  a všechny její podmnožiny pak považovat za uspořádané podle stejného uspořádání je chytrý nápad, který přinese ovoce. Na konci výpočtu je však potřeba zanedbat všechny možné způsoby, kterými jsme  $k$ -prvkové množiny mohli uspořádat. Uvidíte, že nám nakonec opravdu vyjde, že počet všech  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  je vlastně počet všech  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  s nějakým konkrétním uspořádáním dělen počtem způsobů, kolika jsme takové uspořádání mohli zvolit.

Pojďme tedy místo množiny  $\{x_1, \dots, x_k\}$  uvažovat její „uspořádanou verzi“, tím míním  $k$ -tici  $(x_1, \dots, x_k)$ . Rozdíl je samozřejmě v tom, že (třeba pro  $k = 3$ ) je množina  $\{x_1, x_2, x_3\}$  ta samá, co  $\{x_2, x_1, x_3\}$ , ale trojice  $(x_1, x_2, x_3)$  je různá od trojice  $(x_2, x_1, x_3)$ . Záleží na pořadí, v jakém prvky za sebe umísťuji, na *uspořádání*.

Na první straně rovnice vzniklé *počítáním dvěma způsoby* si určíme, kolik různých takových  $k$ -tic mi z jedné množiny může vzniknout. No přeci tolik, kolika způsoby mohu mezi sebou proházet (nebo třeba cizeji „permutovat“  $\leftarrow$  hint btw) její prvky. Každá permutace na  $\{x_1, \dots, x_k\}$  mi určuje přesně jedno možné uspořádání. Těch je, podle [tvrzení 3.2.3](#),  $k!$ . Z definice máme  $\binom{X}{k}$  různých  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  a každá určuje  $k!$  uspořádaných  $k$ -tic. Celkem těchto tedy máme  $k! \cdot \binom{X}{k}$ . To činí jednu stranu naší rovnice.

Na druhé straně, vybrat  $k$  prvků z  $X$  a nějak je uspořádat je přeci to samé, jako jim nějak přiřadit čísla od 1 do  $k$ . Takovéhle přiřazení mi určí přesně, v jakém pořadí prvky  $x_1, \dots, x_k$  jsou. Tedy, ten prvek, který dostane 1, jde první, ten s 2 jde druhý atd.

Uvědomme si, že výběr přesně  $k$  prvků z množiny  $X$  a jejich následné uspořádání (tedy přiřazení čísel od 1 do  $k$ ) je vlastně prosté zobrazení  $f : \{1, \dots, k\} \rightarrow X$ . Každému takovému zobrazení odpovídá uspořádaná  $k$ -tice  $(f(1), \dots, f(k))$  prvků z  $X$  a naopak každou  $k$ -tici  $(x_1, \dots, x_k)$  lze považovat za prosté zobrazení  $g : \{1, \dots, k\} \rightarrow X$  takové, že  $g(i) = x_i$  pro všechna  $i \leq k$ . Čili, pro každou podmnožinu  $\{x_1, \dots, x_k\} \subseteq X$  mám tolik uspořáda-

ných  $k$ -tic  $(x_1, \dots, x_k)$  jako mám prostých zobrazení  $\{1, \dots, k\} \rightarrow X$ . Podle [tvrzení 3.1.2](#) je tento počet roven  $\prod_{i=0}^{k-1} \#X - i$ .

Na závěr již stačí obě množství vzniklá dvěma různými způsoby počítání uspořádaných  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  porovnat. Dostaneme

$$\prod_{i=0}^{k-1} \#X - i = k! \cdot \# \binom{X}{k},$$

odkud okamžitě plyne

$$\# \binom{X}{k} = \frac{\prod_{i=0}^{k-1} \#X - i}{k!}.$$

Diskuse tvořící obsah předchozích dvou stránek je velmi obšírným důkazem následujícího tvrzení.

**Tvrzení 3.3.2 (Počet  $k$ -prvkových podmnožin).** Ať  $X$  je konečná množina. Pak počet všech  $k$ -prvkových podmnožin  $X$  je roven

$$\frac{\prod_{i=0}^{k-1} \#X - i}{k!}.$$

K tomuto tvrzení se víže definice tzv. *kombinačního čísla*.

**Definice 3.3.3 (Kombinační číslo).** Ať  $k, n \in \mathbb{N}$  a  $k \leq n$ . Pak definujeme

$$\binom{n}{k} := \frac{\prod_{i=0}^{k-1} n - i}{k!}.$$

Výraz  $\binom{n}{k}$  čteme  $n$  nad  $k$ .

V závěsu [definice 3.3.3](#) můžeme [tvrzení 3.3.2](#) přepsat jako rovnost

$$\# \binom{X}{k} = \binom{\#X}{k}.$$

Ve škole se často učí interpretace kombinačního čísla  $\binom{n}{k}$  jako „počet způsobů, jak volit  $k$  předmětů z  $n$  bez závislosti na pořadí“. Ta je plně v souladu s naší definicí, interpretujeme-li  $X$  jako množinu předmětů a jednu

její  $k$ -prvkovou podmnožinu jako výběr  $k$  předmětů, kde však pochopitelně (jedná se o **podmnožinu**) nezáleží na jejich uspořádání.

### 3.3.1 Problém rozkladu na sčítance

Oblíbený problém, který lze řešit počítáním způsobů, jak volit počet sourodých předmětů z většího množství, ale nikdo by to na první pohled nečekal, je *problém rozkladu na sčítance*.

Volme číslo  $m \in \mathbb{N}$ . Rozkladem čísla  $m$  na  $r$  sčítanců myslíme rovnost

$$m = x_1 + x_2 + \cdots + x_r = \sum_{k=1}^r x_k,$$

kde  $x_i \geq 0$  jsou nezáporná celá čísla. Zajímá nás, kolika způsoby lze dané číslo  $m$  rozložit na  $r$  (ne nutně různých) sčítanců. Na první pohled nejde vůbec o kombinace (tedy o výběr bez závislosti na pořadí), protože pořadí sčítanců je zde důležité: rozklad  $7 = 0 + 2 + 5$  **je různý** od rozkladu  $7 = 2 + 0 + 5$ . Situace se navíc v tomto směru zdá zcela beznadějná, neboť když jsou dvě a více čísel v rozkladu stejná, pak jejich prohození samozřejmě neurčuje jiný rozklad. Například, v rozkladu  $7 = 2 + 2 + 3$  mohu prohodit první 2 s druhou 2 a nedostat tak odlišný rozklad.

První průlomovou myšlenkou je náhled, že číslo  $m$  vlastně „rozhozují“ mezi  $r$  čísel. V tomto smyslu si lze představit přirozené číslo  $m$  jako  $m$  nerozlišitelných míčků, které rozdělují do  $r$  košíků. Třeba rozklad  $7 = 0 + 2 + 5$  by vypadal takto.

$$\begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \bullet \end{array} = \boxed{\phantom{0}} + \boxed{\bullet \bullet} + \boxed{\begin{array}{c} \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \bullet \end{array}}$$

Obrázek 21: Vizualizace rozkladu  $7 = 0 + 2 + 5$  jako rozdělení míčků do košíků.

Samozřejmě, v takovémto rozkladu určuje pravá strana jednoznačně tu levou, takže není třeba 7 míčků na levé straně znázorňovat. Podobně, když se dohodneme, že počty míčků v koších vždy sčítáme, lze i symboly  $+$  vynechat. Trochu složitější rozklad, třeba  $9 = 1 + 0 + 3 + 5$  bychom nakreslili jak vidno na [obrázku 22](#).



Obrázek 22: Zjednodušený náčrt rozdělení míčků do košíků.

Nakonec si uvědomíme, že přeci není ani třeba kreslit jednotlivé košíky. Stačí, když všechny míčky vysypeme na zem a jenom mezi ně dáme nějaká hradla, abychom věděli, které míčky patřily do stejného košíku. Názorná ukázka, pro stejný rozklad, tedy  $9 = 1 + 0 + 3 + 5$ .

Obrázek 23: Ještě jednodušší náčrt rozkladu  $9 = 1 + 0 + 3 + 5$ .

Jeden možný způsob, jak si snadno představit spojitost mezi rozkladem a touto poslední verzí jeho vizualizace je ten, že stěny či hradla odpovídají symbolům  $+$  a počet míčku mezi dvěma hradly odpovídá číslu mezi příslušnými symboly. Protože sčítanců je  $r$ , a tedy symbolů  $+$  je  $r - 1$ , je hradel též  $r - 1$ .

Jsme připraveni řešení úlohy završit. Rozmysleli jsme si, že každé rozmístění  $r - 1$  hradel mezi  $m$  za sebou v řadě ležících míčků mi definuje jeden konkrétní rozklad čísla  $m$  na  $r$  sčítanců. Stačí tedy umět určit počet takových rozmístění.

To ale není těžké. Míčky a hradla činí dohromady  $m + r - 1$  objektů, z kterých přesně  $r - 1$  jsou hradla. Řečeno jinak, když z  $m + r - 1$  objektů vyberu těch  $r - 1$ , která se stanou hradly, a zbytek přetvořím v míčky, pak určím rozklad čísla  $m$  na  $r$  sčítanců. Počet všech možných výběrů  $r - 1$  prvků z množiny o  $m + r - 1$  prvcích je  $\binom{m+r-1}{r-1}$ , kteréžto číslo je tudíž i počet způsobů, jak rozložit číslo  $m$  na  $r$  sčítanců.

### 3.3.2 Pár vlastností kombinačních čísel

Tahle sekce si neklade za cíl objevit zatím neznámý kontinent ani čtenáře naučit životu v afrických pralesích. Baže naopak, jedná se o prostou přílohu k již známému. Kombinační čísla se objevují, kdykoli člověk počítá s podobjekty konečných objektů, tedy v podstatě pořád. Věnujeme chvilku času prozkoumání způsobů, jak s nimi zacházet.

Nejprve jeden výpočetně užitečný vzoreček.

**Lemma 3.3.4.** At  $k, n \in \mathbb{N}$ ,  $k \leq n$ . Platí

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

**Důkaz.** Z definice kombinačního čísla máme

$$\binom{n}{k} = \frac{\prod_{i=0}^{k-1} n-i}{k!},$$

stačí tedy ukázat, že

$$\prod_{i=0}^{k-1} n-i = \frac{n!}{(n-k)!}.$$

To je však zřejmé, neboť

$$\begin{aligned} n! &= n(n-1)\cdots(n-k+1)(n-k)(n-k-1)\cdots 1 \\ &= n(n-1)\cdots(n-k+1)(n-k)! = \left(\prod_{i=0}^{k-1} n-i\right)(n-k)!. \end{aligned}$$

Důkaz plyne z vydělení poslední rovnice číslem  $(n-k)!$ .  $\square$

Dále si povíme o tzv. *Pascalově trojúhelníku*. Tím se obvykle míní následující struktura.

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & 1 & \\ & & & 1 & & 2 & & 1 \\ & & 1 & & 3 & & 3 & & 1 \\ & 1 & & 4 & & 6 & & 4 & & 1 \\ 1 & & 5 & & 10 & & 10 & & 5 & & 1 \\ & & & & \vdots & & & & & & \end{array}$$

Obrázek 24: Pascalův trojúhelník.

Jde vlastně o posloupnost řad, kde na začátku a na konci každé řady je číslo 1 a prostřední čísla dostanu tak, že sečtu ta dvě čísla z předchozí řady těsně nad ním.

Formálně můžeme říci, že Pascalův trojúhelník je posloupnost uspořáda-



ných  $n$ -tic  $(p_1^n, \dots, p_n^n) \in \mathbb{N}^n$  ( $n$  jsou **indexy** řádků, nikoli mocniny), taková, že  $p_i^n = p_{i-1}^{n-1} + p_i^{n-1}$  pro každé  $n \geq 1$  a každé  $1 \leq i \leq n$ . Pro začátek položíme  $p_1^1 = 1$  a v každém řádku dodefinujeme  $p_0^n = p_{n+1}^n = 0$ .

Skutečně, když  $p_1^1 = 1$ , tedy první číslo prvního řádku je 1, pak  $p_1^2 = p_0^1 + p_1^1 = 0 + 1 = 1$  a  $p_2^2 = p_1^1 + p_2^1 = 1 + 0 = 1$ , čili druhý řádek je dvojice  $(1, 1)$ . Zde vidíte důvod, proč jsme dodefinovali též 0-tý a  $(n+1)$ -ní prvek  $n$ -tého řádku. Museli bychom totiž jinak psát speciální pravidlo pro určení prvního a posledního prvku každého řádku. Místo toho předstíráme, že je Pascalův trojúhelník ještě z obou stran obklopen nulami.

Pro pořádek si ještě v tomto formálním pohledu spočteme třetí řádek, tj. trojici  $(p_1^3, p_2^3, p_3^3)$ . Máme

$$\begin{aligned} p_1^3 &= p_0^2 + p_1^2 = 0 + 1 = 1, \\ p_2^3 &= p_1^2 + p_2^2 = 1 + 1 = 2, \\ p_3^3 &= p_2^2 + p_3^2 = 1 + 0 = 1. \end{aligned}$$

Vše je, jak má být.

Budeme chtít ukázat, že  $n$ -tý řádek Pascalova trojúhelníku tvoří přesně čísla  $\binom{n-1}{0}, \binom{n-1}{1}, \dots, \binom{n-1}{n-1}$ . Pro první řádky je to jistě pravda, neboť  $\binom{0}{0} = 1$  (neboť  $0!$  se tradičně definuje jako 1) a dále  $\binom{1}{0} = \binom{1}{1} = 1$ .

Rozepíšeme si, co naše tvrzení vlastně znamená z pohledu kombinačních čísel. Prvky  $p_i^{n+1}$  v  $(n+1)$ -ním řádku Pascalova trojúhelníku jsou definovány pomocí prvků v předchozím řádku vzorcem  $p_{i+1}^{n+1} = p_i^n + p_{i+1}^n$ . A my tvrdíme, že  $p_i^n = \binom{n-1}{i-1}$ . (Ověřte si, že to je **opravdu** to, co říkáme!) Přepíšeme-li tuto rovnost v kombinačních číslech, potřebujeme dokázat, že

$$\binom{n}{i} = \binom{n-1}{i-1} + \binom{n-1}{i} \quad (*)$$

pro každé  $n \geq 1$  každé  $1 \leq i \leq n$ .

I když by to jistě nějak šlo upočítat, my zvolíme elegantnější způsob, který zůstává věrný tomu, co kombinační číslo vlastně **vyjadřuje**. Nezapomeňte, že  $\binom{n}{i}$  je počet  $i$ -prvkových podmnožin  $n$ -prvkové množiny. Je jisté, že množina  $(i-1)$ -prvkových podmnožin je disjunktní (má prázdný průnik)

s množinou  $i$ -prvkových podmnožin. To ovšem znamená, že

$$\begin{aligned} \# \left( \left( \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i-1} \right) \cup \left( \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i} \right) \right) &= \# \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i-1} + \# \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i} \\ &= \binom{n-1}{i-1} + \binom{n-1}{i}. \end{aligned}$$

Řečeno selsky, když vezmu množinu obsahující všechny  $i$ -prvkové i  $(i-1)$ -prvkové podmnožiny, pak její velikost je počet všech  $i$ -prvkových podmnožin plus počet všech  $(i-1)$ -prvkových podmnožin. No shit.

Čili, abychom dokázali rovnost (\*), najdeme bijekci mezi množinou všech  $i$ -prvkových a  $(i-1)$ -prvkových podmnožin  $(n-1)$ -prvkové množiny a množinou všech  $i$ -prvkových podmnožin  $n$ -prvkové množiny.

**Tvrzení 3.3.5 (Pascalova rovnost).** Ať  $1 \leq i, n \in \mathbb{N}$  a  $i \leq n$ . Pak platí

$$\binom{n}{i} = \binom{n-1}{i-1} + \binom{n-1}{i}.$$

**Důkaz.** Definujeme bijekci

$$f : \left( \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i-1} \right) \cup \left( \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i} \right) \rightarrow \binom{\{1, \dots, n\}}{i}.$$

Ať nejprve  $A \in \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i}$ , čili  $A$  je  $i$ -prvková podmnožina  $\{1, \dots, n-1\}$ . Pak je  $A$  též  $i$ -prvková podmnožina  $\{1, \dots, n\}$ , neboli  $A \in \binom{\{1, \dots, n\}}{i}$  a stačí definovat  $f(A) := A$ . Stručně řečeno,  $f$  je identické zobrazení na  $i$ -prvkových podmnožinách.

Tedž ať  $B \in \binom{\{1, \dots, n-1\}}{i-1}$ . Pak  $B \cup \{n\}$  je  $i$ -prvková podmnožina  $\{1, \dots, n\}$  a tedy můžeme definovat  $f(B) := B \cup \{n\}$ .

Je zřejmé, že  $f$  je bijekce. Když  $A \subseteq \{1, \dots, n\}$  neobsahuje  $n$ , pak je jejím vzorem při  $f$  ta samá množina, tj.  $A$ . Když  $A \subseteq \{1, \dots, n\}$  obsahuje  $n$ , pak je jejím vzorem množina  $A \setminus \{n\} \subseteq \{1, \dots, n-1\}$ .

Tím je důkaz dokončen. □

**Předchozí tvrzení** ukazuje, že pro  $n$ -tý řádek Pascalova trojúhelníka oprav-

du platí rovnost

$$(p_1^n, \dots, p_n^n) = \left( \binom{n-1}{0}, \binom{n-1}{1}, \dots, \binom{n-1}{n-1} \right).$$

Na závěr celé sekce o kombinačních číslech si ukážeme ještě poslední snadno dokazatelnou rovnost, která je však výpočetně též užitečná.

**Lemma 3.3.6.** Ať  $k, n \in \mathbb{N}$  a  $k \leq n$ . Pak

$$\binom{n}{k} = \binom{n}{n-k}.$$

**Důkaz.** Nalezneme bijekci

$$\binom{\{1, \dots, n\}}{k} \rightarrow \binom{\{1, \dots, n\}}{n-k}.$$

Uvědomme si, že když  $A \subseteq \{1, \dots, n\}$  a  $\#A = k$ , pak  $\#(\{1, \dots, n\} \setminus A) = n - k$ . Kýžená bijekce je tudíž zobrazení  $A \mapsto \{1, \dots, n\} \setminus A$ .  $\square$

Ještě několik úloh pro bystré hlavy.

**Cvičení 3.3.1.** Dokažte, že

$$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i}^2 = \binom{2n}{n}.$$

**Hint:** použijte lemma 3.3.6.

**Cvičení 3.3.2.** Dokažte vzorec

$$\sum_{k=r}^n \binom{k}{r} = \binom{n+1}{r+1}$$

pro pevné  $r \in \mathbb{N}$  indukci podle  $n \in \mathbb{N}$ .

**Cvičení 3.3.3 (těžké).** Kolik existuje podmnožin  $\{1, \dots, n\}$ , které neobsahují žádná dvě po sobě jdoucí čísla. Formálně, určete velikost množiny

$$\{A \subseteq \{1, \dots, n\} \mid \{i, j\} \not\subseteq A, \text{ kdykoli } |i - j| = 1\}.$$

**Cvičení 3.3.4 (trocha teorie čísel).** Ať  $p$  je prvočíslo a  $k, n$  přirozená čísla.

- (a) Dokažte, že pro  $k < p$  je  $\binom{p}{k}$  dělitelné  $p$ .
- (b) Dokažte, že  $\binom{n}{p}$  je dělitelné  $p$  právě tehdy, když  $\lfloor n/p \rfloor$  je dělitelné  $p$ , kde  $\lfloor \cdot \rfloor$  značí *dolní celou část*.

**Cvičení 3.3.5.** Budeme vybírat  $k$ -tice předmětů z  $n$  druhů předmětů. Budeme uvažovat různé typy výběru podle toho, jestli vybíráme  $k$ -tice uspořádané, nebo neuspořádané (tj. podmnožiny) a též podle toho, zda každého druhu je vždy jen jeden předmět, či nikoli. Doplňte následující tabulku:

	Jen 1 předmět každého druhu	Libovolně mnoho předmětů každého druhu
Uspořádané $k$ -tice		
Neuspořádané $k$ -tice		

Tabulka 1: Výběr  $k$ -tic předmětů z  $n$  druhů předmětů.

**Cvičení 3.3.6 (těžké).** Kolika způsoby můžeme postavit 7 čarodějnic a 5 vodníků do řady tak, aby 2 vodníci nikdy nestáli vedle sebe?

### 3.4 Princip inkluze a exkluze

Další základní úlohou, která se objevuje napříč diskrétní matematikou, je problém velikosti sjednocení množin.

Velikost průniku se dá spočítat snadno. Člověk se zkrátka podívá, které prvky leží v každé množině, a spočítá je. Vlastně stačí vzít tu nejmenší množinu a započítat jen ty prvky, které leží i ve všech ostatních.

Se sjednocením je to však těžší, neboť některé prvky mohou ležet v jedné množině, ve všech množinách nebo v jakémkoli počtu množin mezi těmito extrémy. Měl-li by člověk počítat velikost sjednocení manuálně, musel by množiny procházet jednu po druhé a navíc si u každého prvku pamatovat, zda ho už započtl, či ještě ne. Tento způsob je sice algoritmicky přímočarý, ale neefektivní i z hlediska výpočetního. Navíc často není ani použitelný, protože se může stát, že znám jen velikosti jednotlivých množin, ale ne přesný výčet jejich prvků. Lepší způsob, který si teď ukážeme a vysvětlíme, počítá, možná i trochu překvapivě, velikost sjednocení vlastně jako součet přes všechny možné průniky.

Nejprve jakýsi „motivační“ příklad. Jeho praktické využití je za účelem zachování jednoduchosti pravdaže poněkud omezené.

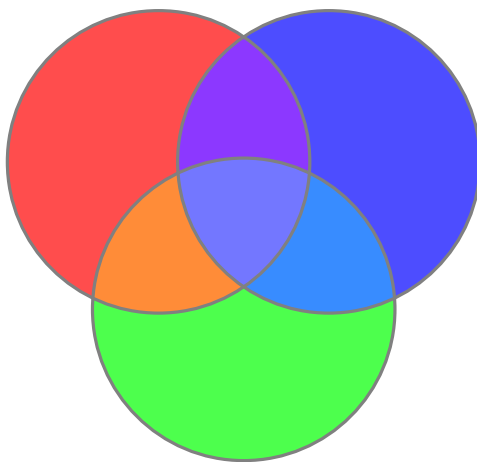
**Příklad.** Na Gymnáziu Growth Severní Obec je možné se učit třem cizím jazykům – němčině, španělštině a francouzštině. Německy se učí 30 studentů, španělsky 25 studentů a 2 velmi nešťastné osoby se učí francouzsky. Přitom, mezi němčináři jsou 4 španělštináři a jeden bageťák. Exkluzivně románským jazykům neholduje nikdo. Jeden no-lífer se ale dokonce učí všem třem jazykům naráz.

Kolik celkem studentů se učí aspoň jednomu cizímu jazyku?

Můžete si zkusit úlohu vyřešit manuálně. Chvilí vám to zabere a na konci navíc zjistíte, že jste vynalezli tzv. *princip inkluze a exkluze*, což je honosný název pro vzoreček, který říká, že velikost sjednocení množin dostanu tak, že sečtu velikosti všech průniků lichého počtu množin a odečtu velikosti průniků sudého počtu množin.

Protože vám předchozí věta vůbec nic neřekla, ukážeme si nejprve na třech množinách (a pomocí obrázků), jak *princip inkluze a exkluze* funguje.

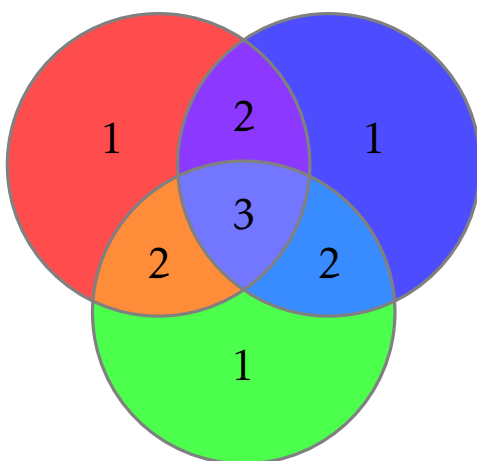
Uvažujme tři množiny  $A$ ,  $B$  a  $C$  s neprázdným průnikem, tedy  $A \cap B \cap C \neq \emptyset$ . Nakreslenou vidíte tuto situaci na [obrázku 25](#).



Obrázek 25: Množiny  $A$ ,  $B$ ,  $C$  s neprázdným průnikem.

Budeme nyní počítat velikost sjednocení  $A \cup B \cup C$ .

Za předpokladu, že by množiny byly disjunktní, stačilo by zkrátka sečíst velikosti jednotlivých množin. V této situaci však započteme některé prvky vícekrát. Stane se to proto, že když sečtu třeba  $\#A + \#B$ , tak prvky, které leží i v  $A$  i v  $B$  (tedy ty v průniku  $A \cap B$ ) započtu dvakrát. Na [obrázku níže](#) vidíte, kolikrát započteme který „díl“ svého Vennova diagramu.

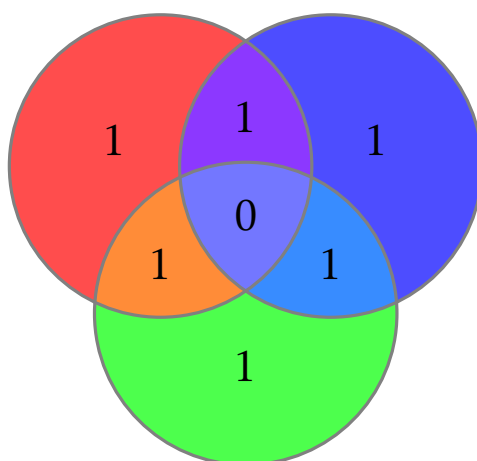


Obrázek 26: Znázornění součtu  $\#A + \#B + \#C$ .

Jak můžete vyčíst z [obrázku](#), některé průniky jsme započítali mockrát. Černá čísla značí, kolikrát jsme každý kousek sjednocení započítali, když

jsme sečetli  $\#A + \#B + \#C$ . Například jsme tedy započítali každý prvek ležící v průniku  $A \cap C$  dvakrát a každý prvek v průniku  $A \cap B \cap C$  dokonce třikrát.

Abychom situaci napravili, a započítali průnik každého páru množin jen jednou, odečteme od součtu  $\#A + \#B + \#C$  velikosti všech průniků dvou množin. Odpovídající diagram vidíte níže.



Obrázek 27: Znázornění výrazu  $\#A + \#B + \#C - \#A \cap B - \#A \cap C - \#B \cap C$ .

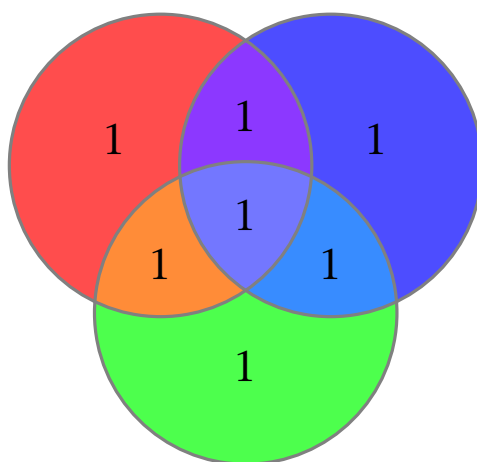
Ovšem, nyní jsme zase odečetli třikrát průnik  $A \cap B \cap C$ , protože každý prvek v  $A \cap B \cap C$  leží zároveň v  $A \cap B$ , v  $A \cap C$  i v  $B \cap C$ , a ty jsme všechny odečetli. Tedy nám z průniku  $A \cap B \cap C$  žádné prvky nezůstaly. Situaci napravíme tím, že jeho velikost přičteme zpátky. Celkově dostaneme pro velikost sjednocení  $\#A \cup B \cup C$  vzorec

$$\#A \cup B \cup C = \#A + \#B + \#C - \#A \cap B - \#A \cap C - \#B \cap C + \#A \cap B \cap C.$$

Finální znázornění vidíte na [obrázku 28](#).

Formální znění principu inkluze a exkluze dí, že tento postup funguje zcela obecně, tedy že pokud průniky sudého počtu množin odečítám a lichého počtu přičítám, dostanu tím velikost sjednocení.

Ještě předtím, než ho uvedeme a dokážeme, si ale určíme počet studentů z [úvodního příkladu](#). Množiny němčinářů, španělštinářů a francouzštinářů označíme po řadě  $N$ ,  $\check{S}$  a  $\check{Z}$  (jako žabožrout). Ze zadání víme, že  $\#N = 30$ ,  $\#\check{S} = 25$  a  $\#\check{Z} = 2$ . Dále víme, že  $\#N \cap \check{S} = 4$ , protože mezi němčináři jsou čtyři španělštináři; podobně  $\#N \cap \check{Z} = 1$  a  $\#\check{S} \cap \check{Z} = 0$ . Konečně,



Obrázek 28: Velikost sjednocení  $\#A \cup B \cup C$  podle principu inkluze a exkluze.

$\#N \cap \check{S} \cap \check{Z} = 1$ . Podle principu inkluze a exkluze máme

$$\begin{aligned} \#N \cup \check{S} \cup \check{Z} &= \#N + \#\check{S} + \#\check{Z} - \#N \cap \check{S} - \#N \cap \check{Z} - \#\check{S} \cap \check{Z} + \#N \cap \check{S} \cap \check{Z} \\ &= 30 + 25 + 2 - 4 - 1 - 0 + 1 = 53. \end{aligned}$$

Celkem se tedy na Gymnáziu Growth Severní Obec učí 53 studentů cizím jazykům.

Posledním krokem, který zbývá, je umět princip inkluze a exkluze nějak rozumně zapsat. Tohle je asi první situace, na kterou jsme narazili, kdy bez rozumného zápisu daného tvrzení bychom se ze symbolů doslova zbláznili (hlavně v jeho důkazu). Natvrdo napsaný říká princip inkluze a exkluze, že

$$\begin{aligned} \#\bigcup_{i=1}^n A_i &= \#A_1 + \#A_2 + \cdots + \#A_n \\ &\quad - \#A_1 \cap A_2 - \#A_1 \cap A_3 - \cdots - \#A_1 \cap A_n - \#A_2 \cap A_3 - \cdots - \#A_{n-1} \cap A_n \\ &\quad + \#A_1 \cap A_2 \cap A_3 + \cdots + \#A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n + \cdots + (-1)^{n-1} \bigcap_{i=1}^n A_i. \end{aligned}$$

Jak sami vidíte, z tohoto zápisu je sotva (pokud vůbec) poznat, čemu se vlastně velikost sjednocení  $\bigcup_{i=1}^n A_i$  rovná. Musíme tento zápis zjednodušit. Nejprve, pro každou  $I \subseteq \{1, \dots, n\}$  znamená zápis

$$\bigcap_{i \in I} A_i$$



průnik přesně těch množin  $A_i$ , jejichž indexy leží v množině  $I$ . Je-li tedy např.  $I = \{1, 4, 5\}$ , pak

$$\bigcap_{i \in I} A_i = A_1 \cap A_4 \cap A_5.$$

Pro extrémní případ  $I = \emptyset$  dodefinujeme  $\bigcap_{i \in I} A_i := \emptyset$ , tedy prázdný průnik je prázdná množina.

Dále si rozmyslíme jednoduchý způsob, jak zapsat znaménko u každého z průniků. Víme, že průnik sudého počtu množin má záporné znaménko a průnik lichého počtu má kladné. Ještě jinak, když  $\#I$  je sudé číslo, pak  $\bigcap_{i \in I} A_i$  musí dostat záporné znaménko, a když  $\#I$  je liché číslo, tak kladné. V matematice se pro tyto účely obvykle používá  $(-1)^k$  pro přirozené číslo  $k \in \mathbb{N}$ , protože  $(-1)^k = 1$ , když  $k$  je sudé, a  $(-1)^k = -1$ , když  $k$  je liché. To ale znamená, že výraz  $\# \bigcap_{i \in I} A_i$  musí být vynásobený číslem  $(-1)^{\#I-1}$ .

Už jsme skoro hotovi. Pro vyjádření  $\# \bigcup_{i=1}^n A_i$  pomocí průniků musíme sečíst velikosti všech průniků  $k$  různých množin pro  $k$  od 1 až do  $n$  se správným znaménkem. Čili, musíme sčítat všechny výrazy  $(-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i$  pro všechny podmnožiny  $I \subseteq \{1, \dots, n\}$ .

Předchozí diskuse nám umožňuje zapsat princip inkluze a exkluze jako rovnost

$$\# \bigcup_{i=1}^n A_i = \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i,$$

kde symbol  $\sum_{I \subseteq \{1, \dots, n\}}$  značí součet přes všechny **podmnožiny** množiny  $\{1, \dots, n\}$ .

Ještě jednou tedy princip inkluze a exkluze formulujeme jako větu.

**Věta 3.4.1 (Princip inkluze a exkluze).** Ať  $A_1, A_2, \dots, A_n$  jsou množiny. Pak platí rovnost

$$\# \bigcup_{i=1}^n A_i = \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i. \quad (\Delta)$$

**Důkaz.** Důkaz povedeme indukcí podle  $n$ .

Když  $n = 1$ , pak na levé straně rovnosti ( $\Delta$ ) máme

$$\# \bigcup_{i=1}^1 A_i = \# A_1$$

a na pravé straně

$$\begin{aligned} \sum_{I \subseteq \{1\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i &= (-1)^{\#\emptyset-1} \# \bigcap_{i \in \emptyset} A_i + (-1)^{\#\{1\}-1} \# \bigcap_{i \in \{1\}} A_i \\ &= (-1)^{-1} \cdot 0 + (-1)^0 \cdot \# A_1 = \# A_1, \end{aligned}$$

protože jediné podmnožiny  $\{1\}$  jsou  $\emptyset$  a  $\{1\}$ . Čili pro  $n = 1$  rovnost ( $\Delta$ ) platí.

Předpokládejme nyní, že rovnost platí pro všechna čísla menší než  $n$  a dokazujeme rovnost pro  $n$ . Sjednocení na levé straně ( $\Delta$ ) můžeme napsat jako

$$\bigcup_{i=1}^n A_i = \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i \cup A_n.$$

Označíme si  $B_1 := \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i$  a  $B_2 := A_n$ . Podle principu inkluze a exkluze pro 2 množiny (ten můžeme použít z indukčního předpokladu) máme

$$\# B_1 \cup B_2 = \# B_1 + \# B_2 - \# B_1 \cap B_2.$$

Přepsání zpět do množin  $A_i$  nám dá

$$\# \bigcup_{i=1}^n A_i = \# \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i \cup A_n = \# \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i + \# A_n - \# \left( \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i \cap A_n \right).$$

Nejprve si uvědomíme, že

$$\left( \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i \right) \cap A_n = \bigcup_{i=1}^{n-1} (A_i \cap A_n),$$

tedy, že je to samé sjednotit množiny  $A_i$  a pak je proniknout s množinou  $A_n$  jako nejprve proniknout každou množinu  $A_i$  s množinou  $A_n$  a pak všechny ty průniky sjednotit.

Teď můžeme (opět z indukčního předpokladu) použít princip inkluze a exkluze na sjednocení  $\bigcup_{i=1}^{n-1} A_i$  a zároveň na  $\bigcup_{i=1}^{n-1} (A_i \cap A_n)$ .

Dostaneme

$$\# \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i = \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n-1\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i$$

a

$$\# \bigcup_{i=1}^{n-1} (A_i \cap A_n) = \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n-1\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} (A_i \cap A_n).$$

Na jedné straně tedy máme vyjádření

$$\begin{aligned} \# \bigcup_{i=1}^n A_i &= \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n-1\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i + \# A_n \\ &\quad - \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n-1\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} (A_i \cap A_n). \end{aligned} \quad (1)$$

Na druhé straně potřebujeme dokázat (**ještě to nevíme!**), že

$$\# \bigcup_{i=1}^n A_i \stackrel{?}{=} \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i. \quad (2)$$

Porovnáváme tedy součty na pravých stranách rovností (1) a (2). Jediný rozumný způsob, jak to udělat, je podívat se, že každý sčítanec v (2) je rovněž sčítancem v (1).

Rozlišíme dva případy podle toho, zda podmnožina  $I$  obsahuje  $n$ , či ne.

(a) Ať nejprve  $n \notin I$ . Pak v sumě (2) je sčítanec

$$(-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i,$$

kde ten průnik neobsahuje  $A_n$ , protože  $n \notin I$ . Jenže pak je  $I \subseteq \{1, \dots, n-1\}$ , a tedy i součet (1) obsahuje ten samý sčítanec (v té úplně první sumě nahoře) se stejným znaménkem.

(b) Teď předpokládáme, že  $n \in I$ . Musíme rozlišit zase dva případy (xD).

( $\alpha$ )  $I = \{n\}$ . Pak součet (2) obsahuje sčítanec

$$(-1)^{\#\{n\}-1} \# \bigcap_{i \in \{n\}} A_i = \#A_n,$$

který je ale i v součtu (1) (mezi těmi dvěma sumami).

( $\beta$ )  $I$  obsahuje  $n$  a  $\#I \geq 2$ . V tomto případě máme v součtu (2) sčítanec

$$(-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i,$$

ježž si však můžeme přepsat jako

$$\begin{aligned} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i &= (-1)^{\#I-1} \# \left( \bigcap_{i \in I \setminus \{n\}} A_i \right) \cap A_n \\ &= (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I \setminus \{n\}} (A_i \cap A_n), \end{aligned}$$

jelikož předpokládáme, že  $n \in I$ . Protože  $I \setminus \{n\} \subseteq \{1, \dots, n-1\}$ , je v součtu (1) (v té sumě dole) sčítanec

$$(-1)^{\#(I \setminus \{n\})-1} \# \bigcap_{i \in I \setminus \{n\}} (A_i \cap A_n),$$

což je v podstatě tentýž, až na znaménko. To však není problém, neboť si můžete všimnout, že v součtu (1) tu druhou sumu obsahující všechny průniky s množinou  $A_n$  odečítám. Tedy, odpovídající sčítanec má ve skutečnosti znaménko  $-(-1)^{\#(I \setminus \{n\})-1} = (-1)^{\#I-1}$ .

Tím jsme ověřili, že součet ve vyjádření (1) obsahuje přesně tytéž sčítance jako součet ve vyjádření (2), a tudíž se jedná o stejný součet. Tím je podle principu matematické indukce důkaz dokončen.  $\square$

Nakonec se podíváme, že věta 3.4.1 souhlasí plně s naší intuicí v již prozkoumaném případě tří množin s neprázdným průnikem.

**Příklad.** Uvažme množiny  $A_1, A_2, A_3$  takové, že  $A_1 \cap A_2 \cap A_3 \neq \emptyset$ . Podle principu inkluze a exkluze počítáme

$$\#A_1 \cup A_2 \cup A_3 = \sum_{I \subseteq \{1,2,3\}} (-1)^{\#I-1} \# \bigcap_{i \in I} A_i.$$

Jednoprvkové podmnožiny  $\{1, 2, 3\}$  jsou  $\{1\}, \{2\}$  a  $\{3\}$ . Tedy započteme

$$(-1)^{1-1} \#A_1 + (-1)^{1-1} \#A_2 + (-1)^{1-1} \#A_3 = \#A_1 + \#A_2 + \#A_3.$$

Ty dvouprvkové jsou  $\{1, 2\}, \{1, 3\}$  a  $\{2, 3\}$ . Dávají nám po řadě sčítance

$$\begin{aligned} & (-1)^{2-1} \#A_1 \cap A_2 + (-1)^{2-1} \#A_1 \cap A_3 + (-1)^{2-1} \#A_2 \cap A_3 \\ &= -\#A_1 \cap A_2 - \#A_1 \cap A_3 - \#A_2 \cap A_3. \end{aligned}$$

Konečně, tříprvkovou podmnožinu má  $\{1, 2, 3\}$  jenom jednu – sebe samu. Za tu si započteme

$$(-1)^{3-1} \#A_1 \cap A_2 \cap A_3 = \#A_1 \cap A_2 \cap A_3.$$

Když sečteme průniky přes všechny podmnožiny  $\{1, 2, 3\}$ , dostaneme

$$\begin{aligned} \#A_1 \cup A_2 \cup A_3 &= \#A_1 + \#A_2 + \#A_3 \\ &\quad - \#A_1 \cap A_2 - \#A_1 \cap A_3 - \#A_2 \cap A_3 \\ &\quad + \#A_1 \cap A_2 \cap A_3, \end{aligned}$$

jak jsme očekávali.

Kterak káže obyčej, pár cvičení závěrem.

**Cvičení 3.4.1** (zase trocha teorie čísel). Jeden z oblíbených a celkem rychlých rozkladů čísla na prvočísla je tzv. *Eratosthenovo síto*.

Funguje na principu vyškrtávání násobků čísel. Konkrétně, algoritmus prochází seznam čísel až do nějaké hranice, a kdykoli narazí na ještě neodškrtnuté číslo, odškrtně z tohoto seznamu všechny jeho násobky kromě něho samotného. Sami si rozmyslete, že tímto způsobem zůstanou ve výsledném seznamu pouze prvočísla.

My si tady rozmyslíme pouze zjednodušenou verzi. Spočtete, kolik zůstane čísel mezi 1 a 1000 potom, co vyškrtneme všechny násobky čísel 2, 3, 5 a 7.

**Cvičení 3.4.2.** Určete počet přirozených čísel menších než 100, které nedělí druhá mocnina žádného přirozeného čísla (kromě 1).

**Cvičení 3.4.3.** Kolika způsoby lze seřadit do řady 5 Čechů, 4 Maďary a 3 Rusy, aby všichni příslušníci jednoho národa nikdy nestáli hned za sebou?

### 3.4.1 Problém šatnářky

Kapitolu o kombinatorickém počítání završíme klasickým *problémem šatnářky*. Jeho tradiční znění je následující.

V jeden chladný podvečer přijde skupina pánů do luxusního podniku. Před vstupem do lokálu si každý z nich odloží svoji černou buřinku (nebo jiné se nenosí) v pánské šatně. Večírek se však neobyčejně prodlužuje a šatnářka, navíc ten den dosti nevyspalá, počne únavou podřimovati. Když ctihodní pánové konečně doflámují, sotva bdělá šatnářka jim při odchodu z šatny náhodně rozdá – jejíma zaslepenýma očima nerozlišitelné – černé buřinky. S jakou pravděpodobností odchází každý pán s cizí buřinkou?

Očíslujeme si pány přirozenými čísly od 1 do  $n$  a jejich buřinky taktéž; čili pánovi číslo  $i$  připadá buřinka číslo  $i$ . Náhodné rozdání buřinek odpovídá výběru permutace  $\sigma \in S_n$ , neboli bijektivního zobrazení  $\sigma : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$ . Podle [tvrzení 3.2.3](#) je počet těchto roven  $n!$ . Jednu konkrétní volbu rozloučení buřinek učiní tedy šatnářka ze zadání problému s pravděpodobností  $1/n!$ . Označíme-li si počet permutací, které žádné číslo nezobrazují na totéž, jako  $s(n)$ , pak řešením problému šatnářky je číslo  $s(n)/n!$ .

Tou netriviální otázkou zůstává, jak  $s(n)$  určit. Postup, který se zde jmeme popsat, využívá „trik“ častý především v teorii pravděpodobnosti. Bývá totiž obvykle výrazně jednodušší spočítat počet objektů, které **splňují** nějakou vlastnost, raději než objektů, které onu vlastnost **nesplňují**. Oba postupy jsou logicky ekvivalentní, neboť počet objektů nesplňujících vlastnost  $V$  je roven rozdílu počtu všech objektů a počtu těch, které vlastnost

V splňují. Výpočetně se však postupy svou obtížností často výrazně liší.

Místo toho, abychom určovali počet permutací  $\sigma \in S_n$ , jež nezobrazí žádný prvek na sebe, budeme počítat permutace, které zobrazí aspoň jeden prvek na sebe. Takovému prvku se pak obvykle říká *pevný bod* dané permutace.

**Definice 3.4.2 (Pevný bod).** Ať  $\sigma \in S_n$ . Prvek  $i \in \{1, \dots, n\}$  nazveme *pevným bodem* permutace  $\sigma$ , pokud  $\sigma(i) = i$ .

Pro dané  $i \in \{1, \dots, n\}$  si ještě označíme

$$\mathcal{P}_i := \{\sigma \in S_n \mid \sigma(i) = i\},$$

čili  $\mathcal{P}_i$  je množina permutací, jejichž pevným bodem (**možná ne jediným!**) je  $i$ . Snadno si rozmyslíme, že množina všech permutací, které mají **aspoň jeden pevný bod**, je právě

$$\mathcal{P}_1 \cup \mathcal{P}_2 \cup \dots \cup \mathcal{P}_n = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i.$$

Vskutku, permutace  $\sigma$  leží v  $\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i$  právě tehdy, když existuje nějaké  $i \in \{1, \dots, n\}$  takové, že  $\sigma(i) = i$ , což je z **definice** právě tehdy, když existuje nějaký její pevný bod. Čili,  $\#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i$  vyjadřuje počet permutací, které zobrazí aspoň jeden prvek na ten samý. Z diskuse výše plyne, že

$$\check{s}(n) = n! - \#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i.$$

Problém šatnářky vyřešíme tím, že určíme  $\#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i$ . Z **věty 3.4.1** můžeme počítat

$$\#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i = \sum_{I \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{\#I-1} \#\bigcap_{i \in I} \mathcal{P}_i. \quad (\square)$$

Dalším krokem ke zdárnému řešení problému je uvědomění, že výraz  $\#\bigcap_{i \in I} \mathcal{P}_i$  záleží pouze na  $\#I$ , nikoli na konkrétních indexech, které se v  $I$  vyskytují. Přeci,  $\#\bigcap_{i \in I} \mathcal{P}_i$  značí počet permutací s přesně  $\#I$  pevnými body. Všimněme si, že ten je určen pouze samotným počtem pevných bodů, a ne jejich konkrétní hodnotou.

Toto pozorování napovídá, že v součtu na pravé straně ( $\square$ ) můžeme sloučit ty sčítance, pro něž je  $\#I$  stabilní. Řečeno přímočařeji, stačí, když budeme

sčítat pouze přes **velikosti** všech podmnožin, a nemusíme sčítat přes individuální podmnožiny, neboť na jejich konkrétních prvcích nezáleží (pouze na jejich velikostech).

Provedeme pro přehlednost ještě poslední přeznačení. Výraz  $P(k)$  bude značit *počet* permutací s přesně  $k$  pevnými body. Díky předchozímu odstavci bychom též mohli být formální a psát, že

$$P(k) = \sum_{\substack{I \subseteq \{1, \dots, n\} \\ \#I = k}} \# \bigcap_{i \in I} \mathcal{P}_i,$$

čili (dokonce správně) tvrdit, že počet permutací s  $k$  pevnými body dostaneme tak, že sečteme počty permutací s pevnými body v podmnožině  $I$  přes všechny  $k$ -prvkové podmnožiny  $I$ .

Nyní můžeme rovnost (□) přepsat do mnohem jednodušší podoby

$$\# \bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} P(k).$$

Opět přeloženo do lidské řeči říkáme, že počet permutací s aspoň jedním pevným bodem můžeme určit jako součet (až na znaménko) všech permutací s přesně  $k$  pevnými body přes všechna  $k$  od 1 do  $n$ . To dává smysl.

Dokážeme-li určit  $P(k)$ , jsme hotovi. K tomu slouží následující lemma.

**Lemma 3.4.3.** At  $k \in \mathbb{N}, k \leq n$ . Platí

$$P(k) = \binom{n}{k} (n-k)! = \frac{n!}{k!}. \quad (\bullet)$$

**Důkaz.** Za důkaz vřele děkujeme laureátovi Fieldsovy medaile, prof. Mgr. et Ing. Jáchymovi Löwenhöfferu, RNDr. et Ph. D., CSc., DSc. Neodvažujeme se však přímo parafrázovat, tedy jej s odpuštěním mírně přeformulujeme.

Permutace s přesně  $k$  libovolnými pevnými body je určena výběrem těchto  $k$  pevných bodů z  $n$  čísel a poté výběrem uspořádání zbývajících  $n-k$  čísel. Výběr  $k$  prvků z  $n$  mohu podle [tvrzení 3.3.2](#) učinit  $\binom{n}{k}$  způsoby. Zvolit permutaci zbývajících  $n-k$  prvků mohu podle [tvrzení 3.2.3](#)  $(n-k)!$  způsoby. Celkem tedy mohu určit jednu permutaci



na  $n$  prvcích s  $k$  pevnými body přesně  $\binom{n}{k}(n-k)!$  způsoby. To dokazuje první rovnost v (•).

Ta druhá plyne z [lemmatu 3.3.4](#), neboť

$$\binom{n}{k}(n-k)! = \frac{n!}{k!(n-k)!}(n-k)! = \frac{n!}{k!}. \quad \square$$

Dopracovali jsme se k závěru problému. Díky [předchozímu lemmatu](#) máme po dosazení do (□) vzorec

$$\#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{n!}{k!}.$$

Čili,

$$\check{s}(n) = n! - \#\bigcup_{i=1}^n \mathcal{P}_i = n! - \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{n!}{k!}.$$

Vytknutí čísla  $n!$  dá snad hezčí vyjádření

$$\check{s}(n) = n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{1}{k!}.$$

Je triviální dokázat, že součet výše konverguje k  $1/e$ , kde písmeno  $e$  značí tzv. [Eulerovo číslo](#). Formálně zapsáno,

$$\sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{1}{k!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{e}.$$

Neformálně tento vztah říká, že čím je vyšší počet přišedších pánů do podniku, tím víc se pravděpodobnost, že šatnářka vrátí každému cizí buřinku, blíží k číslu  $1/e$ . Je tomu tak pro to, že

$$\frac{\check{s}(n)}{n!} = \frac{n! \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{1}{k!}}{n!} = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{1}{k!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{e},$$

kde, pamatujte,  $\check{s}(n)/n!$  je přesně řešení problému šatnářky.

## 4 Teorie grafů

Velkou část moderní matematiky (zcela jistě topologii, geometrii i algebru) tvoří studium „struktur“. Toto obecně nedefinované slovo obvykle značí množinu s nějakou další informací o vztahu mezi jejími prvky – tím obvykle bývá operace nebo třeba, jako v případě grafů, relace.

Tato kapitola zároveň značí jakýsi milník ve vývoji matematického myšlení, především algebraickým směrem. Můžeme se totiž začít bavit o speciálních zobrazeních, které zachovávají strukturu na množinách, mezi kterými vedou, tzv. *homomorfismech*; pochopit, že je dobré mít více popisů stejné struktury ekvivalentních v tom smyslu, že poskytují stejné množství informací, přestože se o žádné bijekci nedá formálně hovořit; uvidět, že je užitečné dva různé grafy (či obecně dvě různé struktury) považovat za stejné, když se liší pouze zanedbatelně.

Jednou, avšak zdaleka ne *jedinou*, motivací pro teorii grafů je schopnost analyzovat struktury tvořené množinou „uzlů“, mezi některýmiž vedou „spojnice“. Takováto struktura úspěšně modeluje až neuvěřitelné množství přírodních i společenských úkazů. Mezi nimi jmenujmež

- návrhy elektrických obvodů, kde uzly jsou elektrická zařízení a spojnice jsou kabely mezi nimi vedoucí;
- lingvistické modely, kde uzly jsou slova a spojnice vede mezi těmi syntakticky souvisejícími;
- studium molekul, kde uzly jsou atomy a spojnice vazby mezi nimi;
- analýza šíření fámy v sociologii, kde uzly jsou lidské komunity a spojnice vede mezi komunitami s bezprostředním kontaktem.

Snad pro to, že uzly a spojnice grafu se obvykle kreslí jako body a úsečky v prostoru, ujaly se pro ně názvy *vrcholy* a *hrany* (jako v mnohoúhelnících), respektive. Struktura zvaná *graf* tedy sestává ze dvou údajů:

- (1) množiny (obvykle konečné) vrcholů značené  $V$  a
- (2) množiny hran  $E$ , která je spjata s množinou vrcholů; toto „sepětí“ se však definuje různě, v závislosti na vkusu a aplikaci. My si ukážeme tři z jistě většího množství různých definic.

Asi prvním přirozeným kandidátem pro „strukturu“ je množina s relací. To je také první způsob, jak si budeme definovat pojem *graf*. Je to také ten nejobecnější v tom smyslu, že jeho pouze drobné modifikace nám umožní definovat i obdobné struktury, jež také zmateně slují *grafy*, byť s přípojným atributem.

Abychom úsečky mezi body mohli popsat jako relaci, čili pomocí uspořádaných dvojic bodů, zcela jistě budeme požadovat, aby nevedly úsečky z bodu do něho samého. Úsečku délky 0 lze totiž triviálně ztotožnit s bodem. Dále, úsečka z bodu  $A$  do bodu  $B$  je jistě tatáž, která úsečka z bodu  $B$  do bodu  $A$ . Tento fakt musí rovněž relace  $E$  odrážet.

První vlastností relace se, snad nepřekvapivě, říká *antireflexivita*. Čili, relace  $E$  na  $V$  je *antireflexivní*, když hrana  $(v, v) \notin E$  pro každý vrchol  $v \in V$ .

Druhou vlastnost už jsme potkali a nazvali ji symetrií. Požadujeme, aby s hranou  $(v, w) \in E$  obsahovala  $E$  též hranu  $(w, v) \in E$  pro každé dva vrcholy  $v, w \in V$ .

**Definice 4.0.1 (Graf poprvé).** Dvojici  $G := (V, E)$ , kde  $V$  je konečná množina a  $E$  je relace na  $V$ , nazveme *grafem*, pokud je  $E$  **antireflexivní** a **symetrická**.

**Poznámka.** Z hlediska ryze formálního neodpovídá tato definice dokonale naší geometrické představě. My jsme totiž pouze požadovali, aby  $E$  obsahovala jak úsečku z  $v$  do  $w$ , tak úsečku z  $w$  do  $v$ , ale nikoli, aby se jednalo o *tutéž* úsečku. Tedy, jedna úsečka mezi body je v množině  $E$  reprezentována dvěma dvojicemi.

Nápravou by bylo definovat navíc ještě relaci  $R$  na  $E$ , kde  $(v, v')$  je v relaci  $R$  s  $(w, w')$  právě tehdy, když  $(w, w') = (v', v)$  nebo  $(w, w') = (v, v')$ . Jinak řečeno, úsečka z bodu  $v$  do bodu  $v'$  je v relaci sama se sebou a s úsečkou z bodu  $v'$  do bodu  $v$ .

Uvážíme-li pak jako hrany grafu  $G$  nikoli množinu  $E$ , ale její třídy ekvivalence podle  $R$  (**Ověřte, že  $R$  je ekvivalence!**), dostaneme již přesnou množinovou paralelu bodů a úseček.

My však budeme v zájmu přehlednosti tento nedostatek ignorovat, protože není pro pochopení ani rozvoj teorie relevantní.

Cesta k druhé možné definici grafu není od první daleká. Stačí vlastně relaci  $E$  interpretovat trochu jinak. Přece, antireflexivní a symetrická relace je „totéž“ jako množina dvouprvkových podmnožin  $V$ .

Vskutku, vezměme nějakou  $E' \subseteq \binom{V}{2}$ . Relaci  $E$  z [definice 4.0.1](#) sestojíme tak, že z množiny  $\{v, w\} \in E'$  vyrobíme dvojici  $(v, w)$  a  $(w, v)$ . Protože prvky v množině nejsou uspořádané a nemohou se opakovat, dává tato konstrukce opravdu antireflexivní a symetrickou relaci. Vizualně odpovídá rozdělení úsečky mezi  $v$  a  $w$  na šipku z  $v$  do  $w$  a šipku z  $w$  do  $v$ .

Z druhé strany, mějme nějakou antireflexivní a symetrickou relaci  $E$  na  $V$ . Protože s dvojicí  $(v, w)$  obsahuje  $E$  i dvojici  $(w, v)$ , můžeme z těchto dvojic ztvárnit množinu  $\{v, w\}$ . Relace  $E$  je antireflexivní, čili se nemůže stát, že  $v = w$ , a množina  $\{v, w\}$  je pročež vždy dvouprvková. Posbíráme-li všechny množiny  $\{v, w\}$  do jedné velké množiny  $E'$ , bude platit  $E' \subseteq \binom{V}{2}$ . Vizualně odpovídá tato konstrukce slepení šipky z  $v$  do  $w$  a šipky z  $w$  do  $v$  do jedné úsečky mezi  $v$  a  $w$ .

**Výstraha.** Mezi množinami  $E$  a  $E'$  **nemůže existovat bijekce**, třeba jen pro to, že  $\#E = 2\#E'$ . Co konstrukce v předchozích dvou odstavcích ukazují, je pouze fakt, že pro naše účely definují  $E$  a  $E'$  stejnou strukturu na množině  $V$ .

Ovšem, uvážili-li bychom místo  $E$  pouze třídy ekvivalence jejích prvků podle relace  $R$  popsané v poznámce pod [definicí 4.0.1](#), pak bychom skutečně tímto způsobem našli bijekci s množinou  $E'$ .

**Definice 4.0.2 (Graf podruhé).** Dvojici  $G := (V, E')$ , kde  $V$  je konečná množina a  $E' \subseteq \binom{V}{2}$ , nazveme *grafem*.

Třetí pohled na hrany v grafu je více „kategoriální“. Zatímco množiny  $E$  a  $E'$  jsou závislé ve své definici na množině  $V$ , třetí množina hran  $E''$ , kterou si zde definujeme, bude libovolná konečná množina.

Tento popis grafové struktury bude odpovídat trochu jiné představě; konkrétně takové, kdy začínáme s množinou bodů  $V$  a s množinou šipek  $E$  (jež jsou od sebe naprosto odděleny) a oba konce každé šipky zapíchneme do dvou různých bodů z  $V$ . Toto „zapíchnutí“ realizují zobrazení  $s, t : E'' \rightarrow V$  (z angl. *source* a *target*), která zobrazují šipky z  $E''$  do bodů z  $V$ . Přičemž

budeme trvat na tom, aby  $s(e) \neq t(e)$  pro všechny šipky  $e \in E''$  a navíc, aby pro každou  $e \in E''$  existovala šipka  $e' \in E''$  taková, že  $s(e) = t(e')$ ,  $t(e) = s(e')$ . Lidsky řečeno, nesmíme zapíchnout konce šipky do téhož vrcholu a, když zapíchneme začátek šipky do bodu  $v$  a její konec do bodu  $w$ , pak musíme vzít další šipku, jejíž začátek zapíchneme do  $w$  a konec do  $v$ .

Je snadné si rozmyslet, že z množiny šipek  $E''$  zrekonstruujeme množinu  $E$  z [definice 4.0.1](#) tak, že z šipky  $e \in E''$  vytvoříme dvojici  $(s(e), t(e)) \in E$ . Podmínky kladené na zobrazení  $s$  a  $t$  zaručují, že vzniklá množina  $E$  je relace na  $V$ , která je antireflexivní a symetrická. V tomto případě dává uvedená konstrukce dokonce bijekci  $E \cong E''$ , čili jsme opět definovali tutéž strukturu na  $V$ .

Tato struktura bude zvlášť užitečná, až budeme probírat *toky v síti*.

**Definice 4.0.3 (Graf potřetí).** Čtveřici  $G := (V, E'', s, t)$ , kde  $V$  a  $E''$  jsou konečné množiny a  $s$  a  $t$  jsou zobrazení  $E'' \rightarrow V$  nazveme *grafem*, pokud

- (a)  $s(e) \neq t(e) \forall e \in E''$  a
- (b)  $\forall e \in E'' \exists e' \in E'' : s(e) = t(e') \wedge t(e) = s(e')$ .

**Poznámka.** Opět, aby [definice 4.0.3](#) odpovídala představě bodů a úseků (nebo oboustranných šipek), museli bychom definovat relaci  $R$  na  $E$  tak, aby  $e$  a  $e'$  byly v  $R$ , právě když  $s(e) = s(e')$  a  $t(e) = t(e')$  nebo  $s(e) = t(e')$  a  $t(e) = s(e')$ . V takovém případě bychom mohli sestavit bijekci mezi  $E''$  a  $E'$  z [definice 4.0.2](#).

**Příklad.** Ať  $V := \{1, 2, 3, 4, 5\}$  a

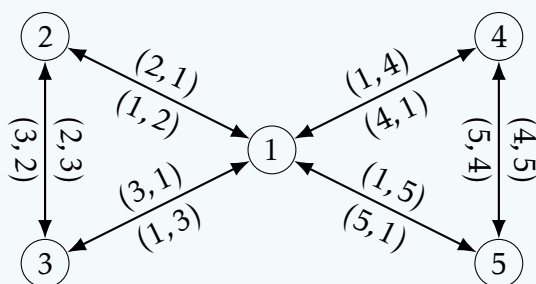
- (1)  $E := \{(1, 2), (2, 1), (1, 3), (3, 1), (1, 4), (4, 1), (1, 5), (5, 1), (2, 3), (3, 2), (4, 5), (5, 4)\}$ ;
- (2)  $E' := \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 4\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{4, 5\}\}$ ;
- (3)  $E'' := \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e'_1, e'_2, e'_3, e'_4, e'_5, e'_6\}$ , kde
  - (a)  $s(e_1) = s(e_2) = s(e_3) = s(e_4) = 1, s(e_5) = 2, s(e_6) = 4,$

(b)  $t(e_1) = 2, t(e_2) = t(e_5) = 3, t(e_3) = 4, t(e_4) = t(e_6) = 5$  a

(c)  $(s(e_i), t(e_i)) = (t(e'_i), s(e'_i))$  pro všechna  $i \leq 6$ .

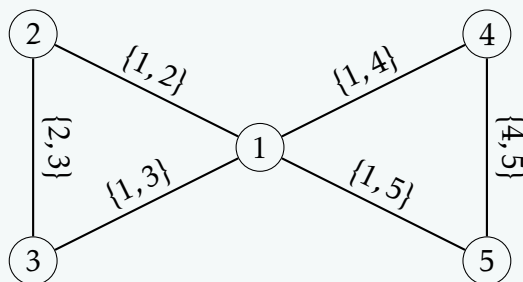
Není těžké nahlédnout, že  $E, E'$  i  $(E'', s, t)$  definují tutéž strukturu na  $V$ . Nakreslíme si grafy  $G = (V, E), G' = (V, E')$  a  $G'' = (V, E'', s, t)$ . Přičemž hrany z  $E$  budeme kreslit jako oboustranné šipky, ty z  $E'$  jako prosté úsečky a ty z  $E''$  rozdělíme na dvě protichůdné šipky, abychom vyjádřili rozdíly v interpretaci těchto grafových struktur.

Graf  $G = (V, E)$  vypadá například [takto](#). Pomněte, že například oboustranná šipka mezi vrcholy 1 a 2 představuje ve skutečnosti **dvě** dvojice –  $(1, 2)$  a  $(2, 1)$  z relace  $E$ .



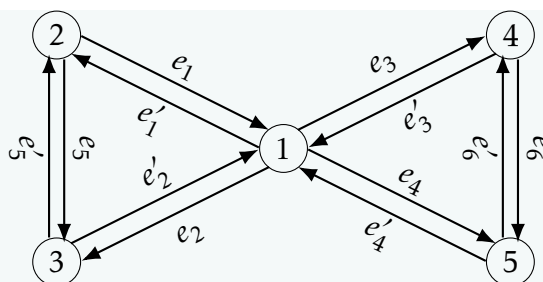
Obrázek 29: Graf jako množina  $V$  s relací  $E$ .

Zcela stejně vypadá i graf  $G' = (V, E')$ .

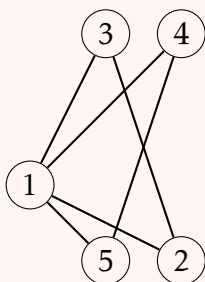


Obrázek 30: Graf jako množiny  $V$  a  $E' \subseteq \binom{V}{2}$ .

Konečně,  $G'' = (V, E'', s, t)$  můžeme načrtnout taktéž velmi podobně.

Obrázek 31: Graf jako množina  $V$  s trojicí  $(E'', s, t)$ .

**Výstraha.** Grafová struktura je obecně zcela nezávislá na jejím nakreslení. Například graf  $G = (V, E')$  z [předchozího příkladu](#) lze ekvivalentně vyobrazit třeba následovně.

Obrázek 32: Graf  $G = (V, E')$  nakreslený jinak.

V následujícím textu spojíme všechny tři interpretace dohromady a pro  $v, w \in V$  budeme hranu mezi  $v$  a  $w$  značit zjednodušeně jako  $vw$ . Pokud nehrozí nedorozumění, budeme pod tímto zápisem rozumět hranu, jejíž začátek je  $v$  a konec  $w$ , čili  $s(vw) = v$  a  $t(vw) = w$ . Avšak, kdykoli se nám to bude hodit, ztotožníme ji bez okolků s hranou  $wv$  s obrácenými konci.

Tento neformální přístup k popisu hran se může zdát jako nebezpečný, ale jak uvidíme, ve skutečnosti velmi zjednodušuje zápis a újma na rigorozitě je obecně minimální. Kompletněji řečeno, hranou mezi dvěma vrcholy  $v, w \in V$  myslíme buď dvojici  $(v, w) \in E$  nebo dvojici  $(w, v) \in E$  nebo množinu  $\{v, w\} \in E'$  nebo prvek  $e \in E''$  takový, že  $s(e) = v$  a  $t(e) = w$ , nebo prvek  $e' \in E''$  takový, že  $s(e') = w$  a  $t(e') = v$ , a je nám to u ...

Obecně, v teorii grafů se velmi často pracuje s konečnými posloupnostmi (či  $n$ -ticemi, chcete-li) vrcholů a hran. Zavedeme proto zjednodušené zna-

čení  $x_1 x_2 \cdots x_n$  pro uspořádanou  $n$ -tici  $(x_1, \dots, x_n)$ . Kdyby hrozil konflikt se zápisem součinu prvků  $x_1, \dots, x_n$ , samozřejmě tento úzus dočasně opustíme.

**Cvičení 4.0.1.** Nakreslete graf  $G = (V, E)$ , kde

- $V = \{1, \dots, 5\}, E = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}.$
- $V = \{1, \dots, 5\}, E = \binom{V}{2}.$
- $V = \{1, \dots, 8\}, E = \{e_1, \dots, e_8\}$  a
  - $t(e_i) = s(e_{i+1}) = i + 1$  pro všechna  $i \leq 7$ ,
  - $t(e_8) = s(e_1) = 1.$

**Cvičení 4.0.2.** Popište všechny grafy  $G = (V, E)$ , kde  $E$  je relace na  $V$ , která je antireflexivní, symetrická (to je součástí definice grafu) a navíc **transitivní**.

**Cvičení 4.0.3.** Ať  $V$  je konečná množina a  $E$  je relace na  $V$ , která je antireflexivní a symetrická. Definujme navíc na  $E$  další relaci  $\sim$  předpisem

$$(v, v') \sim (w, w') \Leftrightarrow (v, v') = (w, w') \vee (v, v') = (w', w).$$

Dokažte, že pak existuje bijekce mezi  $[E]_{\sim}$  a množinou

$$E' := \{\{v, v'\} \mid (v, v') \in E\},$$

čili mezi množinou tříd ekvivalence  $E$  podle  $\sim$  a množinou, kterou dostanu tak, že z uspořádaných dvojic v  $E$  udělám neuspořádané dvojice, tj. dvoupvkové podmnožiny. Pro intuici vizte poznámku pod [definicí 4.0.1](#).

**Cvičení 4.0.4.** Spočítejte, kolik existuje grafů na  $n$  vrcholech.



## 4.1 Pohyb v grafu

Jak jsme zmínili na začátku kapitoly, mnoho aplikací teorie grafů využívá interpretace této struktury jako množiny „uzlů“ se „spojnicemi“, po kterých se dá mezi uzly pohybovat. V této podsekci dáme pohybu po spojnicích formální tvář.

Nejzákladnějším typem pohybu v grafu je libovolná posloupnost vrcholů se zcela přirozenou podmínkou, že mezi vrcholy v posloupnosti bezprostředně za sebou musí vést hrana. Takové posloupnosti se říká *sled* (angl. *walk*).

**Definice 4.1.1 (Sled poprvé).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Posloupnost vrcholů  $v_1 v_2 \cdots v_n$  nazveme *sledem* v grafu  $G$ , pokud  $v_i v_{i+1} \in E$  pro každý index  $i \in \{1, \dots, n-1\}$ .

Je však užitečné si uvědomit, že každý sled lze ekvivalentně definovat jako posloupnost navazujících hran. Tento pohled (jak uvidíme později v kapitole) má své aplikace – často nás totiž zajímá, po kterých spojnicích chodíme, spíše než které uzly procházíme.

Máme-li sled  $v_1 v_2 \cdots v_n$ , tak každá dvojice  $v_i v_{i+1}$  musí být hranou v  $G$ . To ovšem znamená, že zcela identickou informaci poskytuje i posloupnost hran  $e_1 e_2 \cdots e_{n-1}$ , kde  $e_i = v_i v_{i+1}$ .

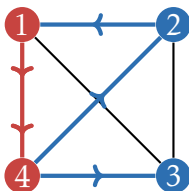
**Poznámka.** Tento princip, který prostupuje matematické struktury, je až překvapivě zásadního významu. Zobecníme-li trochu předchozí pozorování, uvědomíme si, že množina hran vlastně už v sobě obsahuje informaci o všech prvcích množiny  $V$ . Tedy bychom dokonce mohli definovat graf pouze jako množinu hran a množinu vrcholů bychom takto získali automaticky. Opak samozřejmě není pravdou.

Situace, kdy struktura na množině (či něčem složitějším) je dostatečně „hustá“, aby obsahovala kompletní informaci o této množině, je obecně velmi žádaná, jelikož struktura je často konstruována systematicky (a tedy ji rozumíme lépe) ve srovnání s náhodnou volbou její báze množiny.

Pro nedostatek představivosti uvedeme příklad z homologické alge-

bry, kde injektivní a projektivní rezolventy modulů obsahují již kompletní informaci o daném modulu. Tedy člověku pro pochopení teorie modulů z homologického hlediska „stačí“ studovat injektivní a projektivní moduly, které jsou z definice více omezené než moduly obecné, protože snadněji popsitelné.

**Definice 4.1.2 (Sled podruhé).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Posloupnost hran  $e_1 e_2 \dots e_n$  nazveme *sledem* v grafu  $G$ , pokud  $t(e_i) = s(e_{i+1})$  pro všechna  $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ .



Obrázek 33: Příklad sledu 142143 v grafu. Jednou navštívené hrany a vrcholy jsou značené **modře**, dvakrát navštívené **červeně**.

Méně obecným pohybem v grafu je sled, ve kterém se nesmějí opakovat hrany. Takové sledy lze najít často třeba v běžné situaci, kdy si jako rozvůzce jídla plánujete cestu městem. Jako uzly si označíte například místa, která musíte objet, a hrany budou nejkratší trasy mezi nimi. Projít přes některá místa vícekrát vám příliš vadit nemusí, ale ztrácet čas cestováním po stejné trase sem a tam byste neradi.

Takovému sledu se říká *tah* (angl. *trail*). Jeho definice je velmi přirozená.

**Definice 4.1.3 (Tah).** Ať  $G = (V, E)$ . *Tahem* v grafu  $G$  nazveme buď

- (1) sled (vrcholů)  $v_1 v_2 \dots v_n$  takový, že  $v_i v_{i+1} \neq v_j v_{j+1}$  pro všechna  $i \neq j$ , nebo
- (2) sled (hran)  $e_1 e_2 \dots e_{n-1}$  takový, že  $e_i \neq e_j$  pro všechna  $i \neq j$ .

**Výstraha.** Obě uvedené definice tahu jsou v našem (částečně neformálním) pojetí hran skutečně ekvivalentní. Napíšeme-li totiž  $v_i v_{i+1} \neq$

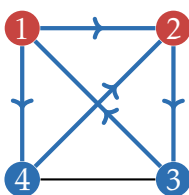
$v_j v_{j+1}$  myslíme tím vlastně dvě nerovnosti:

$$(v_i, v_{i+1}) \neq (v_j, v_{j+1}) \wedge (v_i, v_{i+1}) \neq (v_{j+1}, v_j);$$

nebo zápis můžeme též chápat jako

$$\{v_i, v_{i+1}\} \neq \{v_j, v_{j+1}\},$$

čili každou hranu chceme projít (kterýmkoli směrem) maximálně jednou.



Obrázek 34: Příklad tahu 142312 v grafu. Jednou navštívené hrany a vrcholy jsou značené modře, dvakrát navštívené červeně.

Posledním, a asi nejčastěji zkoumaným, typem pohybu grafem je *cesta* (angl. *path*), což je sled, ve kterém se nesmějí opakovat ani hrany ani vrcholy. Pro jednoduchost je užitečné si uvědomit, že z podmínky neopakování vrcholů automaticky plyne podmínka neopakování hran. Pokud bychom totiž chtěli po nějaké hraně přejít dvakrát, tak zároveň dvakrát projdeme její koncové vrcholy. Definovat cestu pomocí sledu vrcholů je tudíž přímočaré.

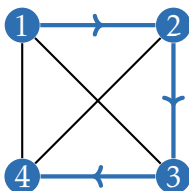
U sledu hran je to však horší. Protože každá hrana definuje dva vrcholy sledu, je třeba zařídit, aby se oba koncové body každé hrany lišily od obou koncových bodů jiné hrany, ale jenom tehdy, když hrany nejdou bezprostředně za sebou. To bohužel vede na trochu neintuitivní definici cesty přes hrany. Totiž, cesta obsahující  $n$  hran nutně obsahuje  $n + 1$  vrcholů, protože po sobě jdoucí hrany vždy sdílejí jeden vrchol. Rafinovaně se tedy cesta přes hrany dá vyjádřit jako tah, kde sjednocení přes všechny hrany (vnímané tentokrát jako množiny) má velikost právě  $n + 1$ .

Studium cest má aplikace například právě v návrhu elektrických obvodů, kdy zcela jistě nechcete, aby do připojených zařízení šel proud z více, než jednoho místa.

**Definice 4.1.4 (Cesta).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. *Cestou* v grafu  $G$  nazveme buď

- (1) sled (vrcholů)  $v_1 v_2 \cdots v_n$  takový, že  $v_i \neq v_j$  pro všechna  $i \neq j$ , nebo
- (2) tah (hran)  $e_1 e_2 \cdots e_{n-1}$  takový, že

$$\# \bigcup_{i=1}^{n-1} e_i = n.$$



Obrázek 35: Příklad cesty 1234 v grafu. Navštívené hrany a vrcholy jsou značené modře.

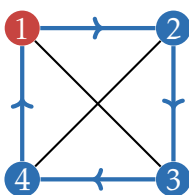
Posledním důležitým konceptem v grafu je tzv. *cyklus* (též *kružnice*, angl. *cycle*). Jedná se vlastně o „téměř cestu“, která končí tam, kde začala. Konkrétně je to tedy cesta prodloužená o svůj první vrchol (samozřejmě automaticky předpokládáme, že existuje hrana z posledního vrcholu do prvního).

**Definice 4.1.5 (Cyklus).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. *Cyklem* v grafu nazveme buď

- (1) sled (vrcholů)  $v_1 v_2 \cdots v_n v_1$ , pokud  $v_1 v_2 \cdots v_n$  je cesta v  $G$ , nebo
- (2) tah (hran)  $e_1 e_2 \cdots e_{n-1} e_n$ , kde  $t(e_n) = s(e_1)$  a  $e_1 e_2 \cdots e_{n-1}$  je cesta v  $G$ .

Příklad cyklu vidíte na [obrázku 36](#). Jejich význam zatím necháme zahalen tajemstvím, jež má být odkryto v nejméně dramatickou chvíli.

**Cvičení 4.1.1.** Ať  $\mathcal{P}_1 = e_1^1 e_2^1 \cdots e_n^1$  a  $\mathcal{P}_2 = e_1^2 e_2^2 \cdots e_n^2$  jsou cesty. Za předpokladu, že  $t(e_n^1) = s(e_1^2)$ , definujeme jejich *sloučení*, které zapíšeme třeba



Obrázek 36: Příklad cyklu 12341 v grafu. Jednou navštívené hrany a vrcholy jsou značené **modře**, dvakrát navštívené **červeně**.

jako  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$ , přirozeně jako posloupnost hran

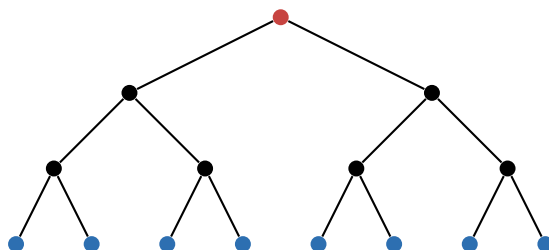
$$\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2 := e_1^1 e_2^1 \cdots e_n^1 e_1^2 e_2^2 \cdots e_n^2.$$

Určete, pro jaké cesty (v obecném grafu)  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2$  platí, že

- $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_2 \oplus \mathcal{P}_1$ ;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  cesta;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  tah;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  sled;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  cyklus.

## 4.2 Stromy

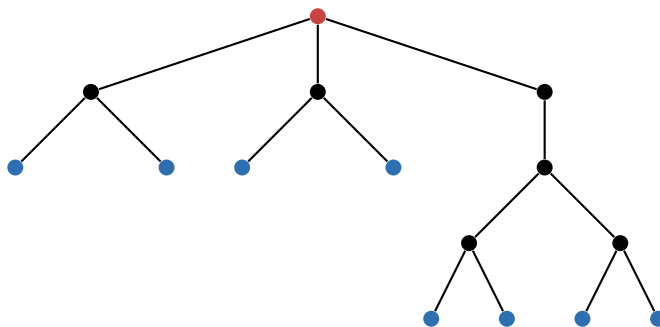
Chvíli se budeme bavit o stromech – ano, těch s listy a kořenem. Stromy jsou speciální typy grafů, které se takto nazývají ne nadarmo. Jsou to totiž grafy, u kterých si člověk může zvolit jakýsi „počáteční“ vrchol (zvaný *kořen*), z něž se po cestě (ve smyslu [definice 4.1.4](#)) vždy dostane do jednoho z „koncových“ vrcholů, tzv. *listů*. Příklad stromu je na [obrázku 37](#).



Obrázek 37: Příklad stromu. Kořen je značen **červeně** a listy **modře**.

**Výstraha.** Listy stromu jsou určeny jednoznačně jeho strukturou (jsou to ty jediné vrcholy, do nichž cesty od kořene mohou pouze vést a nikoli jimi procházet). Za kořen lze však volit libovolný vrchol, klidně i jeden z listů. Strom z [obrázku 37](#) může proto vypadat i jak ukazuje [obrázek 38](#).

Často není nutno o kořenu a listech stromu hovořit, pokud je v konkrétní situaci irelevantní rozlišovat jednotlivé vrcholy. Součástí definice stromu (kterou si záhy odvodíme) kořen ani listy nejsou.



Obrázek 38: Strom z [obrázku 37](#) s jinou volbou kořene.

Nyní si rozmyslíme dvě ekvivalentní definice stromu.

Za první podmínku, abychom mohli graf nazvat stromem, budeme považovat fakt, že od kořene se dá dostat po hranách do každého z listů. Ekvivalentně, že z každého vrcholu se dá cestou dostat do každého vrcholu, protože za kořen lze, jak jsme nahlédli, volit kterýkoli vrchol, a cestu z kořene do vrcholu můžeme zkrátit tak, aby končila v nějakém vrcholu, jímž původně procházela. Grafy splňující tuto podmínku slují *souvislé*.

**Definice 4.2.1 (Souvislý graf).** Graf  $G = (V, E)$  nazveme *souvislým*, pokud pro každé dva vrcholy  $v, w \in V$  existuje cesta z  $v$  do  $w$ , tedy cesta  $v_1 v_2 \dots v_n$ , kde  $v_1 = v$  a  $v_n = w$ .

Samotný název „strom“ plyne z faktu, že se jako graf pouze „větví“, čímž míníme, že při cestě směrem od (libovolného) kořene se jeden může pouze přibližovat k listům, ale nikoli se dostat zpět blíže ke kořeni. To lze snadno zařídit tak, že zakážeme cykly. Totiž, neexistuje-li v grafu cyklus, pak se po libovolné cestě ze zvoleného vrcholu můžeme od tohoto vrcholu pouze vzdalovat. Takové grafy nazveme, přirozeně, *acyklické*.

**Definice 4.2.2 (Acyklický graf).** Graf  $G = (V, E)$  nazveme *acyklický*, pokud neobsahuje cyklus o aspoň třech vrcholech (samotné vrcholy jsou totiž z [definice](#) vždy cykly).

**Definice 4.2.3 (Strom).** Graf  $G = (V, E)$  nazveme *stromem*, je-li souvislý a acyklický.

Na začátku sekce jsme slíbili ještě ekvivalentní definici stromu; ta činí začnou část důvodu užitečnosti stromů, především v informatice.

Ukazuje se totiž, že neexistence cyklů spolu se souvislostí způsobují, že mezi dvěma vrcholy vede vždy **přesně jedna cesta**. Po chvíli zamyšlení snad toto nepřichází jako nijak divoké tvrzení. Přeci, pokud by mezi vrcholy vedly cesty dvě, pak vrchol, kde se rozpojují, a vrchol, kde se opět spojují, by byly součástí cyklu uvnitř stromu, který jsme výslovně zakázali. Třeba překvapivější je fakt, že platí i opačná implikace.

**Tvrzení 4.2.4 (Ekvivalentní definice stromu).** Graf  $G = (V, E)$  je stromem ve smyslu [definice 4.2.3](#) právě tehdy, když mezi každými dvěma

vrcholy  $G$  vede přesně jedna cesta.

**Důkaz.** Dokazujeme dvě implikace. Obě budeme dokazovat v jejich *kontrapozitivní* formě, tedy jako obrácenou implikaci mezi negacemi výroků. Lidsky, dokážeme, že (1) když existují vrcholy, mezi kterými nevede žádná nebo vede více než jedna cesta, pak  $G$  není strom, a (2) když  $G$  není strom, tak existují vrcholy, mezi kterými nevede žádná cesta nebo vede více než jedna.

- (1) Pokud existují vrcholy, mezi kterými nevede cesta, pak  $G$  není souvislý, což odporuje [definici stromu](#). Budeme tedy předpokládat, že existují vrcholy  $v, w$ , mezi kterými vedou různé cesty  $v_1 \cdots v_n$  a  $v'_1 \cdots v'_m$ , kde  $v_1 = v'_1 = v$  a  $v_n = v'_m = w$ . Myšlenka důkazu je najít cyklus obsahující vrchol, kde se cesty rozdělují, a vrchol, kde se opět spojují. Vizte [obrázek 39a](#).

Ať  $r$  (od rozpojení) je **největší** index takový, že  $v_i = v'_i$  pro všechna  $i \leq r$  (čili  $v_r = v'_r$  je vrchol, ve kterém se cesty rozpojují). Ten určitě existuje, protože cesty se v nejhorším případě dělí už ve vrcholu  $v = v_1$ .

Podobně, ať  $s$  (od spojení) je **nejmenší** index takový, že existuje  $k \in \mathbb{Z}$  splňující  $v_j = v'_{j+k}$  pro všechna  $j \geq s$ . Čili, vrchol  $v_s = v'_{s+k}$  je vrchol, ve kterém se cesty opět spojily. Ovšem, mohlo se tak stát v okamžiku, kdy jsme po jedné cestě prošli více nebo méně vrcholů než po druhé – tento počet vyjadřuje ono číslo  $k$ . Takový vrchol jistě existuje, v nejhorším je to přímo koncový vrchol  $w = v_n$ .

Zřejmě platí  $r < s$ , jinak by cesty nebyly různé. Potom je ovšem například posloupnost vrcholů

$$(v_r, v_{r+1}, \dots, v_s = v'_{s+k}, v'_{s+k-1}, \dots, v'_r = v_r)$$

cyklem v  $G$ . Tedy ani v tomto případě  $G$  není strom.

- (2) Když  $G$  není strom, tak není souvislý nebo obsahuje cyklus. Když  $G$  není souvislý, tak existují vrcholy, mezi nimiž nevede v  $G$  cesta, což protirečí podmínce, aby mezi každým párem vrcholů vedla přesně jedna.

Budeme tedy předpokládat, že  $G$  obsahuje cyklus  $v_1 v_2 \cdots v_n$  (tedy  $v_n = v_1$  a  $n \geq 3$ ). Pak ovšem pro libovolné indexy  $i < j \leq n$  jsou

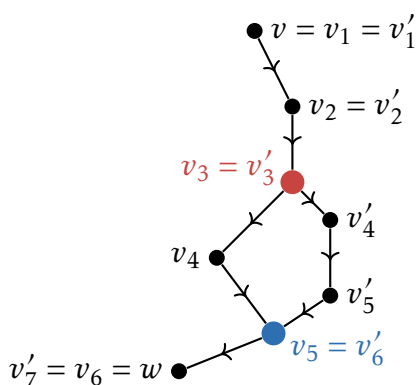


posloupnosti

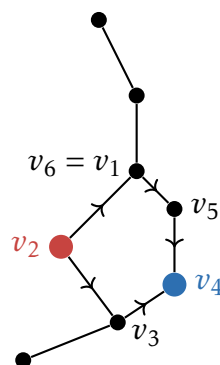
$$(v_i, v_{i+1}, \dots, v_j) \quad \text{a} \quad (v_i, v_{i-1}, \dots, v_1 = v_n, v_{n-1}, \dots, v_j)$$

dvě různé cesty mezi  $v_i$  a  $v_j$ . Vizte [obrázek 39b](#).

Tím je důkaz dokončen. □



(a) Část (1) důkazu [tvrzení 4.2.4](#). Zde  $r = 3, s = 5$  a  $k = 1$ . Sestrojený cyklus je  $v_3v_4v_5v'_5v'_4v'_3$ .



(b) Část (2) důkazu [tvrzení 4.2.4](#). Zde  $i = 2, j = 4$  a sestrojené cesty jsou  $v_2v_3v_4$  a  $v_2v_1v_5v_4$ .

Obrázek 39: Ilustrace k důkazu [tvrzení 4.2.4](#).

**Cvičení 4.2.1.** Dokažte, že je-li  $T = (V, E)$  strom, pak  $\#E = \#V - 1$ .

**Cvičení 4.2.2.** Spočítejte, kolik existuje stromů na  $n$  vrcholech.

### 4.2.1 Minimální kostra

Ne všechny hrany jsou si rovny. Kterési se rodí krátké, jiné dlouhé; kteréši štíhlé, jiné otlé; kteréši racionální, jiné iracionální.

Často nastávají situace, kdy jeden potřebuje hranám grafu přiřadit nějakou hodnotu, obvykle číselnou, která charakterizuje klíčovou vlastnost této hrany. Při reprezentaci dopravní sítě grafem to může být délka silnice či její vytížení, při reprezentaci elektrických obvodů pak například odpor. V teorii grafů takové přiřazení hodnoty hranám grafu sluje *ohodnocení*.

**Definice 4.2.5 (Ohodnocený graf).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Libovolné zobrazení  $w : E \rightarrow \mathbb{R}^+ = (0, \infty)$  nazveme *ohodnocením* grafu  $G$ . Trojici  $(V, E, w)$ , kde  $w$  je ohodnocení  $G$ , nazveme *ohodnoceným grafem*.

**Poznámka.** Každý graf  $G = (V, E)$  lze triviálně ztotožnit s ohodnoceným grafem  $(V, E, w)$ , kde  $w : E \rightarrow \mathbb{R}^+$  je konstantní zobrazení. Obvykle se volí konkrétně  $w \equiv 1$ , tedy zobrazení  $w$  takové, že  $w(e) = 1$  pro každou  $e \in E$ .

Porozumění struktuře ohodnocených grafů může odpovědět na spoustu zajímavých (jak prakticky tak teoreticky) otázek. Můžeme se kupříkladu ptát, jak se nejlépe (vzhledem k danému ohodnocení) dostaneme cestou z jednoho vrcholu do druhého. Slovo „nejlépe“ zde chápeme pouze intuitivně. V závislosti na zpytovaném problému můžeme požadovat, aby cesta třeba minimalizovala či maximalizovala součet hodnot všech svých hran přes všechny možné cesty mezi danými vrcholy. Jsou však i případy, kdy člověk hledá cestu, která je nejbližší „průměru“.

Abychom pořád neříkali „součet přes všechny hrany cesty“, zavedeme si pro toto často zkoumané množství název *váha cesty*. Čili, je-li  $\mathcal{P} := e_1 \cdots e_n$  cesta v nějakém ohodnoceném grafu  $G$ , pak její vahou rozumíme výraz

$$w(\mathcal{P}) := \sum_{i=1}^n w(e_i).$$

Zápis  $w(\mathcal{P})$  můžeme vnímat buď jako zneužití zavedeného značení, nebo jako fakt, že jsme zobrazení  $w$  rozšířili z množiny všech hran na množinu všech cest v grafu  $G$  (kde samotné hrany jsou z [definice](#) též cesty).

**Poznámka.** Záměrně jsme užili slovního spojení *váha cesty* místo snad přirozenějšího *délka cesty*. V teorii grafů se totiž délkou cesty myslí obvykle počet hran (nebo vrcholů), které obsahuje. Délka cesty  $\mathcal{P} = e_1 \cdots e_n$  je tudíž  $n$  (resp.  $n + 1$ ), bo obsahuje  $n$  hran (resp.  $n + 1$  vrcholů).

Tento úzus svědčí účelu [předchozí poznámky](#). Pokud totiž každý graf bez ohodnocení vnímáme vlastně jako ohodnocený graf, kde každá hrana má váhu přesně 1, pak váha každé cesty je rovna její délce.

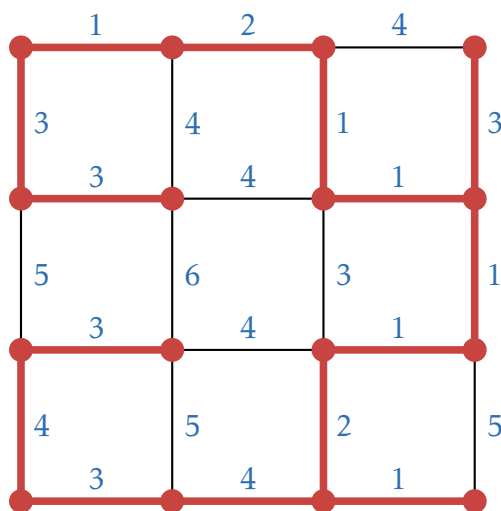
První (a nejjednodušší) problém, kterým se budeme zabývat, je nalezení

*minimální kostry* (angl. *spanning tree*).

**Definice 4.2.6 (Minimální kostra).** Ať  $G = (V, E, w)$  je **souvislý** ohodnocený graf. Ohodnocený graf  $K = (V', E', w)$  nazveme *minimální koustou* grafu  $G$ , pokud je souvislý,  $V' = V$  (tedy  $K$  obsahuje všechny vrcholy  $G$ ),  $E' \subseteq E$  a

$$\sum_{e \in E'} w(e)$$

je minimální vzhledem ke všem možným volbám podmnožiny  $E' \subseteq E$ . Lidsky řečeno, graf  $K$  spojuje všechny vrcholy  $G$  tím „nejlevnějším“ způsobem vzhledem k ohodnocení  $w$ .



Obrázek 40: **Minimální kostra** grafu s ohodnocením  $w$ .

**Pozorování.** Minimální kostra ohodnoceného grafu je strom.

**Důkaz.** Kdyby minimální kostra nebyla strom, pak buď není souvislá, což jsme výslovně zakázali, nebo obsahuje cyklus. Tudiž se mezi nějakými dvěma vrcholy dá jít po více než jedné cestě, a proto můžeme přinejmenším jednu hranu z kostry odebrat. Protože každá hrana má kladné ohodnocení, snížili jsme tím součet hodnot všech hran. To je spor.  $\square$

**Důsledek 4.2.7.** Minimální kostra ohodnoceného stromu je s ním totožná.

Minimální kostra je zvláště užitečná právě při návrhů elektrických obvodů, kdy je potřeba zařídit, aby všechna připojená zařízení čerpala co nejmenší množství energie. Protože elektřina proudí rychlostí světla, délka kabelu (pokud není zrovna mezigalaktický) nás příliš netrápí, ale právě odpor či kvalita/vodivost konkrétních spojů by mohly.

Další praktickou grafovou úlohou vedoucí na problém nalezení minimální kstry je potřeba spojit vzdálené servery. Korporace mají obvykle mnoho různých serverů rozmístěných po světě, jež spolu ale musejí sdílet data. Problém je v tom, že propojení mezi servery by nejen mělo vést k nejmenší možné prodlevě při přenosu dat (od toho **minimální**), ale nesmí ani obsahovat cykly (od toho **kostra**). Kdyby totiž cykly obsahovalo, pak by se při přenosu dat stalo, že by aspoň jeden server v tomto cyklu dostal aspoň dvakrát stejnou informaci z dvou různých zdrojů, ale v odlišný čas. Taková situace vede nezbytně dříve nebo později ke korupci dat; řekněme, když daný server už s obdrženou informací začal po přijetí provádět výpočet. Pro více detailů k tomuto využití minimálních koster vizte [Spanning Tree Protocol](#).

#### 4.2.2 Kruskalův algoritmus

Na problém nalezení minimální kstry souvislého ohodnoceného grafu existuje skoro až zázračně přímočarý algoritmus, pojmenovaný po americkém matematiku, Josephu B. Kruskalovi. Jeho základní myšlenkou je prostě začít s grafem  $K$  obsahujícím všechny vrcholy z  $V$  a přidávat hrany od těch s nejnižším ohodnocením po ty s nejvyšším tak dlouho, dokud nevznikne souvislý graf. Je potřeba pouze dávat pozor na cykly. K tomu stačí si pamatovat stromy (jako množiny vrcholů), které přidáváním hran vytváříme, a povolit přidání hrany jedině v případě, že spojuje dva různé stromy.

Pro zápis v pseudokódu vizte [algoritmus 1](#). Manim s průběhem algoritmu s náhodně vygenerovaným hodnocením je k dispozici [zde](#).

**Algoritmus 1:** Kruskalův algoritmus.

---

**input** : souvislý ohodnocený graf  $G = (V, E, w)$ , kde  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$   
**output**: množina hran  $E'$  minimální kostry grafu  $G$

---

```

1 Inicializace;
2  $E' \leftarrow \emptyset$ ;
3 Množina hran, které nelze přidat (jinak by vznikl cyklus);
4  $X \leftarrow \emptyset$ ;
5 for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
6   Každý strom nejprve obsahuje pouze jediný vrchol;
7    $T_i \leftarrow \{v_i\}$ ;
8 Množina indexů pro pamatování sloučených stromů;
9  $I \leftarrow \{1, \dots, n\}$ ;
10 Přidávám hrany, dokud mám pořád víc než jeden strom;
11 while  $\#I > 1$  do
12    $e \leftarrow$  libovolná hrana s minimální  $w(e)$ , která není v  $E'$  ani v  $X$ ;
13    $i \leftarrow$  index v  $I$  takový, že  $s(e) \in T_i$ ;
14    $j \leftarrow$  index v  $I$  takový, že  $t(e) \in T_j$ ;
15   if  $i = j$  then
16     Hrana spojuje vrcholy ve stejném stromě, jejím přidáním by
17     vznikl cyklus;
18      $X \leftarrow X \cup \{e\}$ ;
19   else
20     Hrana spojuje různé stromy. Přidávám ji do kostry;
21      $E' \leftarrow E' \cup \{e\}$ ;
22      $T_i \leftarrow T_i \cup T_j$ ;
23      $I \leftarrow I \setminus \{j\}$ ;
23 return  $E'$ ;

```

---

**Tvrzení 4.2.8.** Kruskalův algoritmus je korektní.

**Důkaz.** Potřebujeme ověřit, že

- (1) algoritmus provede pouze konečný počet kroků;
- (2) algoritmus vrátí správnou odpověď.

Případ (1) je zřejmý, protože  $\#E < \infty$ , čili algoritmus přidá do  $E'$  pouze

konečně mnoho hran. Navíc, graf  $G$  je z předpokladu souvislý, a tedy vždy existuje hrana  $e$  spojující dva různé stromy  $T_i$  a  $T_j$ .

V případě (2) uvažme, že  $K = (V, E', w)$  není minimální kostra  $G$ . V takovém případě se mohlo stát, že

- (a)  $K$  není strom – tedy buď není souvislý nebo obsahuje cyklus;
- (b) existuje podmnožina  $E'' \subseteq E$  taková, že  $K' = (V, E'', w)$  je strom a

$$\sum_{e \in E''} w(e) < \sum_{e \in E'} w(e).$$

Případ (a) lze vyloučit snadno, neboť souvislost  $K$  plyne ihned ze souvislosti  $G$ , tedy, jak již bylo řečeno v bodě (1), vždy lze nalézt hranu spojující do té doby dva různé stromy. Pokud  $K$  obsahuje cyklus, tak algoritmus musel v jednom kroku spojit hranou dva vrcholy ze stejného stromu, což je spor.

Pokud nastal případ (b), pak musejí existovat hrany  $e'' \in E'' \setminus E'$  a  $e' \in E' \setminus E''$  takové, že  $w(e'') < w(e')$ . Protože algoritmus zkouší přidávat hrany vždy počínaje těmi s nejmenší vahou, musel v nějakém kroku narazit na hranu  $e''$  a zavrhnout ji. To ovšem znamená, že hrana  $e''$  spojila dva různé vrcholy téhož stromu a graf  $K' = (V, E'', w)$  obsahuje cyklus. To je spor s předpokladem, že  $K'$  je strom. Tedy, taková podmnožina  $E'' \subseteq E$  nemůže existovat a  $K$  je vskutku minimální kostra  $G$ .  $\square$

**Výstraha.** Minimální kostra grafu **není jednoznačně určena!** Všimněte si, že na řádku 12 **Kruskalova algoritmu** volím **libovolnou** hranu, která má ze všech zatím nepřidaných nejnižší váhu a jejímž přidáním nevznikne cyklus.

**Poznámka.** V **definici minimální kostry** požadujeme, aby  $G$  byl souvislý graf. Pokud tomu však tak není, je pořád možné zkonstruovat minimální kostru pro každou část  $G$ , která souvislá je (pro každou jeho tzv. *komponentu souvislosti*), zkrátka tím, že **Kruskalův algoritmus** spouštíme opakovaně.

**Cvičení 4.2.3** (Těžké ale fun). Ať  $V$  je množina  $n$  bodů v rovině. Pro každé dva body  $x, y \in V$  definujme váhu hrany  $xy$  jako vzdálenost bodů  $x$  a  $y$ . Čili, pokud  $x = (x_1, x_2)$  a  $y = (y_1, y_2)$ , pak

$$w(xy) := \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}.$$

Vzniklý graf označme obvykle  $G$ .

- (a) Ukažte, že v každé minimální kostře  $G$  vede z každého vrcholu maximálně 6 hran.
- (b) Ukažte, že existuje minimální kostra  $G$ , jejíž hrany se (jakožto úsečky v rovině) nekříží.

**Cvičení 4.2.4.** Úplným grafem na  $n$  vrcholech myslíme graf  $G = (V, \binom{V}{2})$ , tedy graf, mezi každým párem jehož vrcholů vede hrana. Takový graf se obvykle značí  $K_n$ . Najděte minimální kostru  $K_n$  a spočtěte její váhu (tj, součet vah všech jejích hran), je-li  $V = \{1, \dots, n\}$  a

- (a)  $w(ij) = \max(i, j)$ ,
- (b)  $w(ij) = i + j$ ,

pro všechny páry  $i, j \leq n$ .

**Cvičení 4.2.5.** Dokažte, že když  $w$  (tj. ohodnocení  $G$ ) je prosté zobrazení, pak je minimální kostra  $G$  určena jednoznačně.

### 4.3 Jordanovo centrum

V návaznosti na [sekcí o minimální kostře](#) se rozhovoříme o jednom dalším optimalizačním problému – konkrétně hledání „centra“ ohodnoceného grafu.

Motivační úlohou je tzv. *facility location problem*, v přibližném překladu *úloha umístění střediska*. Jde o úlohu, kdy máte danu dopravní síť sídlišť (obecně obydlených zón) a význačných uzlů, přes které se chtě nechtě musí jezdit (například velké křižovatky, Nuselák apod.). Hrany vedou mezi sídlišti či uzly, když od jednoho k druhému vede bezprostřední cesta (tedy cesta neprocházející žádným jiným sídlištěm nebo uzlem).

Pojďme si úlohu rozmyslet podrobně. Máme u nějakého uzlu v síti dopravních křižovatek postavit středisko. Bez ohledu na typ střediska nás pravděpodobně zajímá, aby se všichni z obydlených zón, které má toto středisko pokrýt, dostali k němu co nejdříve. Ovšem, výraz „co nejdříve“ je matematicky příliš vágní. Jistě hledáme optimální řešení, ale v jakém smyslu konkrétně?

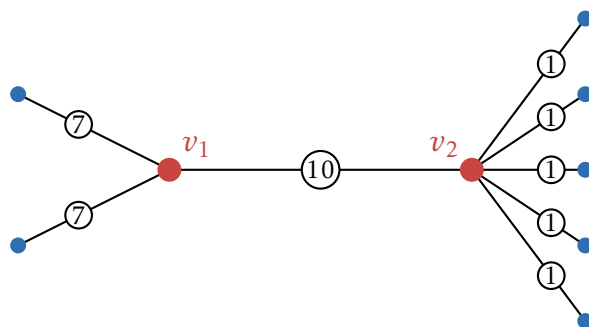
Snad bude užitečné kýžený smysl optimality vyzkoumat na příkladě. Řekněme, že střediskem, jež potřebujeme umístit, je nemocnice. Co znamená, že je vzhledem k dané síti nemocnice *optimálně* umístěna? První, co by nás mohlo napadnout, je chtít, aby průměr vzdáleností od obydlených zón k nemocnici byl co nejmenší. To je přirozená myšlenka, ale jak si ihned rozmyslíme, vcelku morbidní.

U průměru totiž často nastává situace, že značný počet nízkých hodnot převáží nad zanedbatelným počtem hodnot vysokých. Uvažte síť uzlů a sídlišť danou grafem na [obrázku 41](#), kde sídliště jsou značena [modře](#), dopravní uzly [červeně](#) a ohodnocení hran, jak je vlastně zvykem, značí průměrnou dobu jízdy po těchto cestách.

V tomto případě by uzel [v<sub>2</sub>](#) jistě nabízel mnohem lepší průměrné řešení, neboť můžeme snadno spočítat, že průměrná doba jízdy od libovolného sídliště k němu je asi pět a půl minuty. Naopak, průměrná doba jízdy k uzlu [v<sub>1</sub>](#) činí těsně pod deset minut.

My se ale přesto rozhodneme postavit nemocnici v uzlu [v<sub>1</sub>](#). Proč? Totiž, při stavbě nemocnice nám nejde ani tolik o to, aby se do ní dostalo co nejvíce lidí co nejrychleji, ale **aby to nikdo neměl příliš daleko**. Kdybychom





Obrázek 41: Špatně vyvážená síť **sídlíšť** a **dopravních uzlů**.

učinili opak a postavili nemocnici v uzlu  $v_2$ , pak by sice lidé ze sídlíšť na pravé straně to měli do nejbližší nemocnice pouhou minutu, ale lidé z levých sídlíšť by cestovali průměrně až sedmnáct minut. Do uzlu  $v_1$  se dostane každý člověk nejpozději za jedenáct minut.

Tento způsob měření vhodnosti umístění nemocnice v dopravních sítích je skutečně v praxi používaný a je dozajista nepěkným příkladem volby menšího ze dvou zel. Tedy, není prioritou, aby se někomu dostalo pomoci velmi brzy, ale aby se nikomu nedostalo pomoci příliš pozdě.

Problém, jenž jsme právě zformulovali, je variantou výše zmíněného *facility location problem* (dále jen FLP), která sluje EFLP, tedy *emergency facility location problem*. Úlohou je nalézt takový uzel, jehož **maximální** vzdálenost ke všem ostatním uzlům je minimální, čili uzel pro umístění středisek jako jsou právě nemocnice a polikliniky, či obecněji „pohotovostní“ střediska.

Druhou známou variantou je SFLP, čili *service facility location problem* – úloha nalézt vhodný uzel pro umístění střediska „služeb“, kde je naopak žádoucí, aby nastala druhá z výše diskutovaných situací, aby se k němu přiblížilo co nejvíce lidí co nejrychleji. Ti, již cestují dlouho, budou na nejméně libý pád kalé nálady sedíce rozčileně ve voze a shrbení klejíce ustavičně v kolena, však nezhytnou.

Formálně tedy hledáme uzel, který minimalizuje průměr všech vzdáleností od něj ke všem ostatním uzlům. Pro usnadnění výpočtu je dobré si uvědomit, že minimalizovat **průměr** všech vzdáleností je totéž, co minimalizovat **součet** všech vzdáleností, neboť počet uzlů se nemění (**Rozmyslete si to!**).

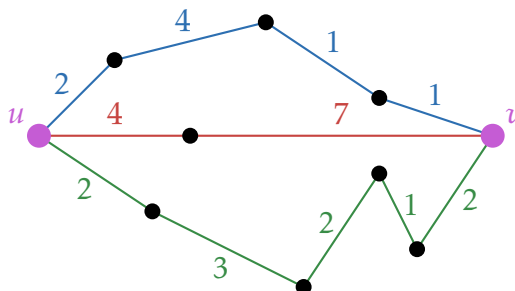
K formulaci obou úloh potřebujeme zavést základní pojem *vzdálenosti* mezi vrcholy v ohodnoceném grafu.

V zájmu strohosti vyjádření označíme pro libovolné dva vrcholy  $u, v \in V$  grafu  $(V, E, w)$  symbolem  $\mathcal{P}(u, v)$  množinu všech cest mezi  $u$  a  $v$ . Speciálně,  $\mathcal{P}(v, v) = \{v\}$ , čili cesta z vrcholu do něj samého obsahuje pouze tento jeden vrchol, a  $\mathcal{P}(u, v) = \emptyset$ , pokud mezi  $u$  a  $v$  nevede v  $G$  cesta.

**Definice 4.3.1 (Vzdálenost v grafu).** Ať  $G = (V, E, w)$  je ohodnocený graf a  $u, v \in V$ . *Vzdálenost* mezi  $u$  a  $v$  v grafu  $G$ , značenou  $d_G(u, v)$  (z angl. **d**istance), definujeme jako

$$d_G(u, v) := \begin{cases} \min_{\mathcal{P} \in \mathcal{P}(u, v)} w(\mathcal{P}), & \text{pokud } \mathcal{P}(u, v) \neq \emptyset; \\ \infty, & \text{pokud } \mathcal{P}(u, v) = \emptyset. \end{cases}$$

Lidsky řečeno, vzdáleností mezi vrcholy je váha nejkratší cesty mezi nimi vedoucí, pokud taková existuje.



Obrázek 42: Zde  $d_G(u, v)$  je váha nejkratší, to jest **modré**, cesty.

Abychom našli pro daný graf  $G = (V, E, w)$  řešení EFLP, musíme najít takový vrchol, který minimalizuje největší možnou vzdálenost od něj ke všem ostatním vrcholům  $G$ . Takový vrchol (nebo vrcholy?) nazveme *Jordanovým centrem* grafu  $G$ , po žabožroutím počtáři, Marie E. C. Jordanovi.

Samozřejmě, nezajímá-li nás vzdálenost ke **všem** vrcholům, jako je tomu v příkladě umístění nemocnice, uvážíme pouze maximum vzdáleností k relevantním vrcholům (tedy k sídlištím). Na principu úlohy to nic nemění.

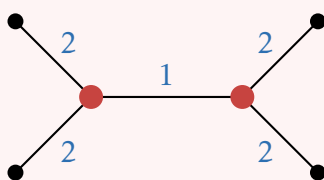
Formálně, *excentricita* vrcholu  $v \in V$  je kvantita  $e(v) := \max_{u \in V} d_G(v, u)$ , tedy maximum přes všechny vzdálenosti od něj k ostatním vrcholům. Toto číslo vyjadřuje, jak moc je vrchol vzdálen od „ideálního centra“ grafu,

tedy od bodu, od kterého by každý vrchol byl stejně daleko. Samozřejmě, toto ideální centrum málokdy existuje, takže hledáme pouze vrchol s nejmenší excentricitou, s nejmenší *odchylkou* od centra.

**Definice 4.3.2 (Emergency Facility Location Problem).** Ať  $G = (V, E, w)$  je **souvislý** ohodnocený graf. Úlohu nalézt vrchol s minimální excentricitou nazveme EFLP. Jejím **řešením** je vrchol s touto vlastností, tedy vrchol  $c \in V$  splňující

$$e(c) = \min_{v \in V} e(v).$$

**Výstraha.** Řešení EFLP **není jednoznačně určeno!** Vizte např. graf na obrázku 43.



Obrázek 43: **Vrcholy s minimální excentricitou** v grafu  $G = (V, E, w)$ .

**Definice 4.3.3 (Jordanovo centrum).** Množinu všech řešení EFLP pro graf  $G = (V, E, w)$  nazýváme *Jordanovým centrem* grafu  $G$ .

**Definice 4.3.4 (Poloměr grafu).** Je-li  $c$  vrchol v Jordanově centru grafu  $G = (V, E, w)$ , pak hodnotu  $e(c)$  nazýváme *poloměrem* grafu  $G$  a značíme ji  $\rho(G)$ .

**Poznámka.** V **definici EFLP** jsme požadovali, aby byl graf souvislý. To z ryze technického hlediska není nutné, protože excentricita vrcholu je definována i pro nesouvislý graf. Uvědomme si ale, že pro nesouvislý graf je excentricita každého vrcholu rovna  $\infty$ , tedy Jordanovým centrem je celý graf a úloha poněkud pozbývá smyslu.

Obdobným způsobem si formalizujeme i SFLP.

Nyní chceme nalézt vrchol, který minimalizuje průměr (nebo ekvivalent-

ně součet) vzdáleností od něj  $k$ , buď všem nebo pouze zajímavým, vrcholům. Názvosloví zde poněkud selhává a tomuto součtu přes vzdálenosti ke všem vrcholům se rovněž často přezdívá *excentricita*. Abychom pojmy odlišili, slovo „excentricita“ přeložíme a budeme říkat „výstřednost“. Tedy, *výstředností* vrcholu  $v \in V$  v ohodnoceném grafu  $G = (V, E, w)$  myslíme číslo

$$e'(v) := \sum_{u \in V} d_G(v, u).$$

**Definice 4.3.5 (Service Facility Location Problem).** Ať  $G = (V, E, w)$  je souvislý ohodnocený graf. Úlohu nalézt vrchol s minimální výstředností nazveme SFLP. Jejím řešením je vrchol  $c' \in V$  s touto vlastností, tedy takový, že

$$e'(c') = \min_{v \in V} e'(v).$$

Pochopitelně, stejně jako EFLP, i SFLP může mít více řešení. Avšak, podle našeho nejlepšího vědomí se množině řešení SFLP nijak význačně neříká. Minimální výstřednost se občas nazývá *status* grafu  $G$ . Etymologie tohoto názvosloví je spjata s novodobým využitím SFLP při vyvažování nervových sítí a její zevrubné objasnění je nad rámec tohoto textu.

**Definice 4.3.6 (Status grafu).** Ať  $G = (V, E, w)$  je souvislý ohodnocený graf. Když  $c' \in V$  je řešení SFLP, pak se hodnota  $e'(c')$  nazývá *status* grafu  $G$  a značí se  $\sigma(G)$ .

**Výstraha.** Řešení EFLP a řešení SFLP mohou (ale **nemusí**) být disjunktní. Vrátime-li se ke grafu na [obrázku 41](#), pak řešením EFLP je pouze vrchol  $v_1$ , zatímco řešením SFLP je pouze vrchol  $v_2$ .

Následující podsekcí dedikujeme obecnému algoritmu, pomocí nějž lze také hledat řešení jak EFLP, tak SFLP. Poznamenejme však, že existují mnohem efektivnější algoritmy, jež naleznou řešení těchto úloh; tyto ale vyžadují o poznání hlubší poznatky teorie grafů.

### 4.3.1 Floydův-Warshallův algoritmus

Vlastně jedinou výzvou na cestě k vyřešení FLP je umět aspoň rámcově efektivně najít vzdálenost mezi všemi dvojicemi vrcholů. Bohužel, žádná pěkná věta jako Pythagorova, která umožňuje okamžitě počítat vzdálenosti bodů v Eukleidovských prostorech, v teorii grafů neexistuje a existovat nemůže.

Připomeňme, že v ohodnoceném grafu  $G = (V, E, w)$  je vzdálenost vrcholů  $u, v \in V$  **definována** jako váha nejkratší cesty. Poznamenejme, že zde slovo „nejkratší“ chápeme ve smyslu *váhy* cesty (tedy součtu vah všech jejích hran), nikoli ve smyslu *délky* cesty (tedy počtu jejích hran). Asi bychom měli říkat „nejlehčí“ cesta, to je ale poněkud nepřírozené...

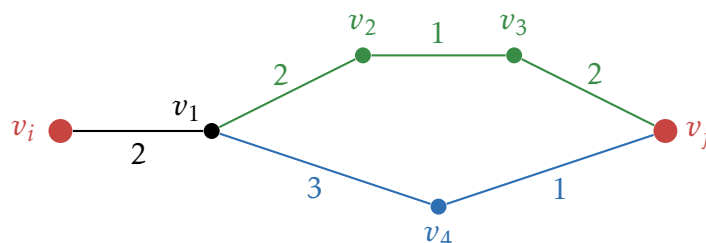
Floydův-Warshallův algoritmus nesouvisí přímo s FLP. Je to algoritmus, který nalezne vzdálenost (tedy váhu nejkratší cesty) mezi všemi dvojicemi vrcholů. Je však zřejmé, jak znalost této informace vede okamžitě k řešení EFLP, resp. SFLP. V moment, kdy známe vzdálenost každého vrcholu od každého, stačí pouze spočítat excentricitu, resp. výstřednost, každého vrcholu a vybrat pouze ty s minimální.

Jistě není překvapením, že zkoušet z každého vrcholu všechny možné cesty do všech ostatních vrcholů a z nich vybírat ty nejkratší, není dvakrát efektivní. Floydův-Warshallův algoritmus stojí na dvou principech, jimž se především v programování říká *rekurze* a *dynamické programování*. Jejich úplné pochopení a nabytí schopnosti využívat může být časově náročné, ale Floydův-Warshallův algoritmus jich využívá velmi přímočaře. Postupně si rozebereme, že ze znalosti váhy nejkratší cesty mezi dvěma vrcholy, **která využívá jen nějakou podmnožinu ostatních vrcholů**, lze zvětšováním této podmnožiny získat nakonec váhu nejkratší cesty mezi těmito vrcholy v celém grafu (odtud *rekurze*). Dále, ze znalosti vzdálenosti mezi určitými dvojicemi vrcholů můžeme rychle určit vzdálenost mezi párem, u kterého jsme ji zatím neznali (odtud *dynamické programování*).

Naši práci v této podsekci je dát předchozímu odstavci formální podobu. Ať  $G = (V, E, w)$  je souvislý ohodnocený graf, kde  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ . Definujme zobrazení  $\delta : \{1, \dots, n\}^3 \rightarrow \mathbb{R}^+$  následovně. Ať  $\delta(i, j, k)$  je váha nejkratší cesty mezi  $v_i$  a  $v_j$  **využívající pouze vrcholy z podmnožiny vrcholů**  $\{v_1, \dots, v_k\}$  (samozřejmě, kromě počátečního  $v_i$  a koncového  $v_j$ ). I když je  $G$  souvislý, tak taková cesta nemusí vždy existovat; v takovém případě je  $\delta(i, j, k) = \infty$ . Je snadné si uvědomit, že  $d_G(v_i, v_j) = \delta(i, j, n)$ , čili vzdále-

nost mezi vrcholy v grafu  $G$  je váha nejkratší cesty, která smí využít jeho všechny vrcholy.

Je zřejmé, že  $\delta(i, j, k) \leq \delta(i, j, k-1)$ , neboť máme jeden vrchol navíc, a přes ten může vést nějaká kratší cesta. Základní, a vlastně jedinou, myšlenkou Floydova-Warshallova algoritmu je pozorování, že když nastane situace, kdy  $\delta(i, j, k) < \delta(i, j, k-1)$ , pak ta kratší cesta musí využívat vrchol  $v_k$ . Ovšem, takovou cestu lze rozdělit na dvě – na cestu z  $v_i$  do  $v_k$  a cestu  $v_k$  do  $v_j$ . Původní cesta  $v_i \cdots v_k \cdots v_j$  využívala pouze vrcholy z  $\{v_1, \dots, v_k\}$ , takže obě její části,  $v_i \cdots v_k$  i  $v_k \cdots v_j$  využívají pouze vrcholy z  $\{v_1, \dots, v_{k-1}\}$ . Zároveň to musejí být právě ty nejkratší cesty mezi  $v_i$  a  $v_k$  a  $v_k$  a  $v_j$ , jinak by celková cesta  $v_i \cdots v_k \cdots v_j$  nebyla ta nejkratší. Mrkněte na [obrázek 44](#).



Obrázek 44: Zde  $\delta(i, j, 3) = 7$ , ale  $\delta(i, j, 4) = 6$ .

Odtud plyne, že  $\delta(i, j, k)$  je buď

- rovna  $\delta(i, j, k-1)$ , pokud přes vrchol  $v_k$  nevede žádná kratší cesta z  $v_i$  do  $v_j$ , nebo
- rovna součtu vah nejkratší cesty z  $v_i$  do  $v_k$  a nejkratší cesty z  $v_k$  do  $v_j$ , pokud přes vrchol  $v_k$  nějaká kratší cesta z  $v_i$  do  $v_j$  vede. V symbolech je tento součet roven  $\delta(i, k, k-1) + \delta(k, j, k-1)$ .

Předchozí body se dají shrnout do jednoho zápisu, neboť  $\delta(i, j, k)$ , jakožto váha **nejkratší** cesty, je vždy menším z obou množství. Konkrétně, vzoreček stojící za celým Floydovým-Warshallovým algoritmem je tento:

$$\delta(i, j, k) = \min(\delta(i, j, k-1), \delta(i, k, k-1) + \delta(k, j, k-1)). \quad (\Delta)$$

Možná už vás napadá, jak samotný algoritmus bude fungovat. Přeci, čísla  $\delta(i, j, k)$  mohu spočítat pro všechny dvojice  $(i, j) \in \{1, \dots, n\}^2$  v moment, kdy znám  $\delta(i, j, k-1)$  opět pro všechny dvojice  $(i, j)$ . Jenže,  $\delta(i, j, 0)$  je váha hrany

mezi  $v_i$  a  $v_j$ , pokud existuje, jinak  $\infty$ . Symbolicky,

$$\delta(i, j, 0) = \begin{cases} w(v_i v_j), & \text{pokud } v_i v_j \in E, \\ \infty, & \text{jinak.} \end{cases}$$

To znamená, že znám hodnotu  $\delta(i, j, 0)$  pro všechny dvojice  $(i, j)$ , a tedy postupným zvyšováním  $k$  umím spočítat i všechny hodnoty  $\delta(i, j, k)$ , a tím i nakonec, pro  $k = n$ , vzdálenosti mezi všemi páry vrcholů.

Nyní, když jsme myšlenku algoritmu doufám objasnili, zbývá jeho postup nějak rozumně zapsat. Naštěstí to lze velmi přímočaře, dokonce výrazně snadněji než například [Kruskalův algoritmus](#).

Vlastně nám jde o to postupně nacházet kratší a kratší cesty mezi všemi dvojicemi vrcholů. Ten fakt, že hledáme vzdálenosti mezi vskutku **všemi** dvojicemi, nám umožňuje díky závěrům v předchozích odstavcích toto dělat efektivně.

Algoritmus vytváří zobrazení  $D : V^2 \rightarrow [0, \infty]$ , kterým si vlastně „pamatuje“ váhu zatím nejkratší nalezené cesty mezi každými dvěma vrcholy. Na začátku algoritmu je tudíž  $D(v, v) := 0$  pro všechny  $v \in V$  a  $D(u, v) := w(uv)$  pro všechny dvojice  $(u, v) \in V^2$ , mezi kterými vede hrana. Pro všechny ostatní dvojice  $(u, v)$  pokládáme  $D(u, v) := \infty$ .

Opíraje se o předšedší úvahy víme, že budeme muset učinit v algoritmu  $n$  kroků (to je počet vrcholů  $G$ ) a v  $k$ -tém kroku vždy počítat hodnoty  $\delta(i, j, k)$  pro všechny dvojice  $(i, j)$ . Přejeme si tudíž, aby hodnoty z předchozího kroku, tj.  $\delta(i, j, k-1)$ , byly před spuštěním  $k$ -tého kroku všechny již zakódovány v zobrazení  $D$ , jakožto čísla  $D(v_i, v_j)$ , představující **zatím** nejkratší známé cesty mezi všemi dvojicemi vrcholů. Rovnost ( $\Delta$ ) se pročež překládá (**v rámci  $k$ -tého kroku algoritmu**) do rovnosti

$$D(v_i, v_j) = \min(D(v_i, v_j), D(v_i, v_k) + D(v_k, v_j)).$$

Po skončení  $n$ -tého kroku bude tedy zobrazení  $D$  přesně odpovídat zobrazení  $d_G$ . Konečně můžeme přikročit k samotnému pseudokódu, jenž si prohlédněte [níže](#).

**Cvičení 4.3.1.** Dokažte, že [Floydův-Warshallův](#) algoritmus selže, když připustíme i záporná ohodnocení hran.

---

**Algoritmus 2:** Floydův-Warshallův algoritmus.

---

**input** : souvislý ohodnocený graf  $G = (V, E, w)$ , kde  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ **output**: zobrazení  $D : V^2 \rightarrow [0, \infty]$  takové, že  $D \equiv d_G$ 

```

1  Inicializace;
2  for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
3      for  $j \leftarrow 1$  to  $n$  do
4          if  $i = j$  then
5              Vzdálenost od vrcholu k němu samému je 0;
6               $D(v_i, v_i) \leftarrow 0$ ;
7          else
8              if  $v_i v_j \in E$  then
9                  Vzdálenost mezi různými vrcholy je váha hrany, pokud
10                 existuje;
11                  $D(v_i, v_j) \leftarrow w(v_i v_j)$ ;
12             else
13                 Jinak nastavíme hodnotu na  $\infty$ ;
14                  $D(v_i, v_j) \leftarrow \infty$ ;
15
16  Postupně pro každé  $k$  od 1 do  $n$  budeme zmenšovat hodnoty  $D(v_i, v_j)$ 
17  pro všechny dvojice  $(i, j)$ ;
18  for  $k \leftarrow 1$  to  $n$  do
19      for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
20          for  $j \leftarrow 1$  to  $n$  do
21               $D(v_i, v_j) \leftarrow \min(D(v_i, v_j), D(v_i, v_k) + D(v_k, v_j))$ ;
22
23  return  $D$ ;

```

---



## 4.4 Vzdálenost vrcholů

Sekci motivujeme úlohou „jako ze života“, která ve mně budí jistou míru nostalgie, jelikož jsem ji řešil na konci prvního ročníku v rámci zkoušky z programování. Dovolil jsem si ji ovšem literárně obohatit.

**Úloha** (Rodinný výlet). Je prodloužený víkend a slezská rodina Koláčků plánuje cyklistický výlet oblastí Karviná. Jedou děda Koláček se svou chotí, babičkou Koláčkovou, a jejich čtyři uřvaná rozmazlená vnoučata – Matouš, Marek, Lukáš a Jan.

Z Třince do Orlové dánt jest směr a, i přes relativní nenáročnost terénu, vnoučata ustavičně fňukají, že chtějí jet tou nejkratší trasou. Děda Koláček, dobrodinec ten od kosti, snaží se vnoučatům vyhovět a nejkratší trasu úpěnlivě hledá. Do vřavy se přidává babička Koláčková, která ví, že trasa z Třince do Orlové vede přes mnoho malých vesnic, mnohože z nich hostí aspoň jednu hospodu.

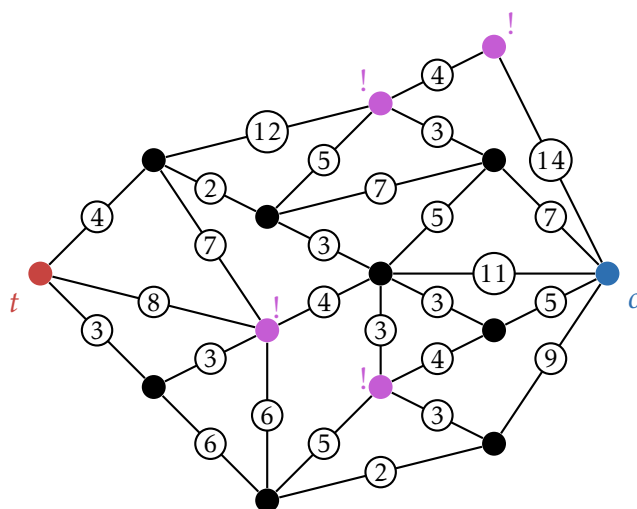
Vědouc velmi dobře, že každá hospoda zbrzdí cestu na nejméně půl hodiny a že i při mimoděčné zmínce o blízké hospodě si děda Koláček počíná mnouti pivní pupek, trvá babička Koláčková na tom, aby vybraná cesta z Třince do Orlové vedla přes vesnice, které jsou tak daleko od hospod, jak je to jen možné. Křik vnoučat brzy ji však přesvědčí, že délka trasy převažuje nad množstvím hospod, ke kterým se po cestě přiblíží.

Koláčkovíc rodina tudíž stojí před nelehkým úkolem vybrat ze všech nejkratších cest z Třince do Orlové tu, která je hospodám co nejvíce vzdálena.

Brzy znaven, děda Koláček posílá nezkrotná vnoučata s konečně neosedlanými bicykly domů a výlet do Orlové se odkládá na příští školní prázdniny. Pomozme mu jej zorganizovat předem.

Úlohu si modelujeme ohodnoceným grafem  $G = (V, E, w)$ . Vrcholy představují vesnice, případně města, mezi Třincem a Orlovou, z nichž některé jsou označeny vykřičníkem minicím přítomnost jedné či více hospod.

Nejprve se soustředíme na nejpodstatnější část úlohy, tou jest nalezení nejkratší cest mezi Třincem a Orlovou, kterážto města si v zájmu strohosti

Obrázek 45: Graf obcí mezi **Třincem** a **Orlovou**.

označíme písmeny  $t, o \in V$ .

První, co by člověka mohlo napadnout je spustit **Floydův-Warshallův algoritmus**. Zde je však nutno si uvědomit, že ten není možné modifikovat tak, aby hledal vzdálenost mezi dvěma konkrétními vrcholy. Totiž, z popisu jeho průběhu plyne, že váhu nejkratší cesty mezi dvěma vrcholy, která vede pouze přes vrcholy z množiny  $\{v_1, \dots, v_k\}$ , umím spočítat teprve tehdy, když znám váhy nejkratších cest používajících pouze vrcholy  $v_1, \dots, v_{k-1}$  mezi **všemi dvojicemi vrcholů** v grafu  $G = (\{v_1, \dots, v_n\}, E, w)$ . Odtud plyne, že Floydův-Warshallův algoritmus potřebuje znát zatím nejkratší nalezenou cestu mezi každými dvěma vrcholy, aspoň dokud  $k$  není  $n$ .

Samozřejmě je též možné najít **všechny** cesty mezi danými dvěma vrcholy a z nich vybrat tu nejkratší. Tento postup je však ještě výrazně méně efektivní než Floydův-Warshallův algoritmus.

Není však radno zoufat, bo algoritmus pro relativně efektivní nalezení vzdálenosti mezi určenými dvěma vrcholy v grafu existuje. Nosí jméno svého tvůrce, holandského informatika a programátora Edsgera W. Dijkstra (čteno „dajkstry“). Není složitý, ale zcela jistě je méně přímočarý než **Kruskalův** i **Floydův-Warshallův** algoritmus.

Pozastavme se na moment a oceňme tu ironii, že najít efektivní algoritmus na výpočet vzdálenosti mezi dvěma vrcholy je výrazně obtížnější než na

výpočet vzdálenosti mezi všemi dvojicemi vrcholů.

#### 4.4.1 Dijkstrův algoritmus

Dijkstrův algoritmus má mnoho společného s [Floydovým-Warshallovým algoritmem](#), například rovněž v každém kroku zlepšuje zatím nejlepší známou vzdálenost od *zdrojového* vrcholu k ostatním. Jeho základní myšlenka je však jiná. Dijkstrův algoritmus využívá tzv. „průchod do šířky“, což znamená, že se „šíří“ od jednoho zvoleného *zdrojového vrcholu* nejprve do jeho sousedů (tj. do vrcholů s ním spojených hranou). Při průchodu si u každého vrcholu pamatuje zatím nejlepší nalezenou cestu ze zdrojového vrcholu do něj, a kdykoli vstoupí do dalšího vrcholu, ověří, zda cesta, po které se do něj dostal, není kratší než dosavad nejlepší.

Tento postup sám není nijak revoluční a průchod do šířky je asi tak starý jako grafy samotné. Myšlenka, se kterou Edsger Dijkstra přišel, však na svou dobu revoluční byla, neboť se jednalo o tehdy nejefektivnější způsob nalezení vzdálenosti mezi vrcholy v ohodnoceném grafu. U každého vrcholu si pamatoval váhu zatím nejkratší nalezené cesty od zdroje k němu. Uvědomil si, že **pokud vybírá vrcholy vždy od těch s minimální uloženou hodnotou**, tak v moment, **kdy projde všechny sousedy nějakého vrcholu**, pak už **je zapamatovaná hodnota v tomto vrcholu nejlepší možná**, tedy se jedná o skutečnou vzdálenost od zdroje k tomuto vrcholu a už se do něj nikdy nemusí znovu vracet.

Důvod, proč tomu tak je, není na první pohled zřejmý a objasníme ho podrobně v důkazu správnosti Dijkstrova algoritmu.

Ještě před slovním popisem a představením pseudokódu je dobré se zamyslet, o kolik více efektivní je Dijkstrův způsob oproti prostému průchodu do šířky. Pro úplnost:

- Průchod do šířky vždy putuje od vrcholu ke všem jeho sousedům, od těch zase k jejich sousedům a tak dále. Tedy se mnohokrát může (a **musí**, aby našel opravdu nejkratší cestu) vracet do vrcholů, které již prošel, v moment, kdy do nich přes nějaké vrcholy dříve navštívené vede cesta.
- Dijkstrův algoritmus nahlédne z právě vybraného vrcholu do jeho sousedů, ale pak nepokračuje nutně jimi. Naopak, právě vybraný vr-

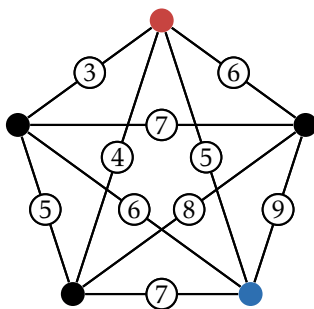
chol již „uzamkne“ a pokračuje nějakým s minimální uloženou zatím nejkratší cestou ze zdroje do něj.

Kvůli tomu, že přes sousedy každého vrcholu může zpět do něj vést nějakou oklikou cesta zpátky, projdu při běžném průchodu do šířky úplně všechny cesty v grafu  $G$ .

Naopak, Dijkstrův algoritmus *zakazuje* vracet se do vrcholů, jejichž všichni sousedi již byli navštíveni. Tedy, každý vrchol je navštíven v nejhorším tolikrát, kolik má sousedů. Je snadné si rozmyslet, o kolik je (řádově) v průměrném případě počet sousedů vrcholu nižší než počet cest jím procházejících.

Největší časový rozdíl mezi obvyklým průchodem do šířky a Dijkstrovým algoritmem je vidět v tzv. *úplných grafech*, tedy grafech, ve kterých je každý vrchol spojen s každým. V úplném grafu na  $n$  vrcholech, který se často značí  $K_n$ , definuje libovolná podmnožina vrcholů cestu. Již dlouho víme, že všech podmnožin množiny o  $n$  prvcích je  $2^n$ . Tedy, algoritmus průchodu do šířky udělá při hledání vzdálenosti mezi dvěma vrcholy v úplném grafu vždy  $2^n$  kroků. Oproti tomu, Dijkstrův algoritmus udělá v grafu na  $n$  vrcholech vždy nejvýše  $n(n-1)$  kroků, protože každý vrchol má nejvýše  $n$  sousedů. Už jen pro graf na 10 vrcholech je číslo  $10 \cdot 9$  přibližně 900krát menší než číslo  $2^{10}$ .

Na [obrázku 46](#) vidíte úplný graf na 5 vrcholech. Upřímně doporučuji, abyste si tvrzení předchozího odstavce vyzkoušeli v praxi.



Obrázek 46: Ohodnocený úplný graf na pěti vrcholech s vyznačeným **zdrojovým** a **cílovým** vrcholem.

Nyní přistoupíme ke slovnímu popisu Dijkstrova algoritmu. Algoritmus striktně vzato nepočítá vzdálenost mezi dvěma vrcholy, anobrž vzdálenost od *zdrojového vrcholu* ke všem ostatním.

Podobně jako [Floydův-Warshallův algoritmus](#), i Dijkstrův algoritmus vytváří postupně zobrazení  $d : V \rightarrow [0, \infty]$  takové, že po jeho skončení platí  $d(v) = d_G(s, v)$  pro všechna  $v \in V$  a nějaký pevně zvolený zdrojový vrchol  $s \in V$ . Na začátku algoritmu je pročež  $d(s) = 0$  a  $d(v) = \infty$  pro všechny  $s \neq v \in V$ . V každém kroku algoritmu navíc existuje množina  $X$  „zakázaných“ vrcholů, do kterých už není možné se dívat ani vracet. V moment, kdy procházím sousedy právě vybraného vrcholu, ignoruji ty, které již byly někdy zakázány.

Jeden krok algoritmu vypadá takto:

- (1) Označ jako zvolený vrchol libovolný  $v \in V$  s **minimální**  $d(v)$ .
- (2) Pro každého souseda  $u$  zvoleného vrcholu  $v$  porovnej zatím nejkratší známou cestu z  $s$  do  $u$ , to jest  $d(u)$ , s váhou zatím nejkratší cesty z  $s$  do  $u$  vedoucí přes  $v$ , to jest  $d(v) + w(uv)$ . Je-li druhá hodnota menší, změň  $d(u)$  na  $d(v) + w(uv)$ .
- (3) Vrchol  $v$  označ jako zakázaný.
- (4) Pokud ještě existuje vrchol, který není zakázaný, opakuj (1).

Jak jsme již psali – fakt, že jako další vrchol v pořadí volíme ten s minimální známou nejkratší cestou z  $s$ , umožňuje se nikdy do vrcholů, jejichž sousedy projdeme, nevracet, není samozřejmý. Výklad o obecném chodu Dijkstrova algoritmu zakončíme prezentací jeho pseudokódu pro **souvislý** ohodnocený graf  $G = (V, E, w)$  s pevně zvoleným zdrojovým vrcholem  $s \in V$ . Ihned poté dokážeme jeho správnost.

**Poznámka.** Stejně jako [Floydův-Warshallův algoritmus](#), ani Dijkstrův algoritmus neselže pro nespojitelné grafy, ale všem vrcholům  $v \in V$  nedosažitelným z  $s$  zůstane hodnota  $d(v) = \infty$ , tedy je zcela zbytné nespojitelné grafy uvažovat.

Pro stručnost vyjádření zavedeme ještě značení

$$n(v) := \{u \in V \mid uv \in E\},$$

čili označíme výrazem  $n(v)$  (od angl. *neighbour*), množinu všech sousedů vrcholu  $v \in V$ .

---

**Algoritmus 3:** Dijkstrův algoritmus

---

**input** : souvislý ohodnocený graf  $G = (V, E, w)$  s počátečním vrcholem  $s \in V$

**output:** zobrazení  $d : V \rightarrow [0, \infty]$  takové, že  $d \equiv d_G(s, -)$

```

1 Inicializace;
2  $d(s) \leftarrow 0;$ 
3 for  $v \in V \setminus \{s\}$  do
4    $d(v) \leftarrow \infty;$ 
5  $X \leftarrow \emptyset;$ 
6 Pokračuj, dokud existují nezakázané vrcholy;
7 while  $X \neq V$  do
8   Najdi vrchol s minimální zatím nejlepší známou vzdáleností od s;
9    $v \leftarrow$  libovolný vrchol s minimální  $d(v)$  takový, že  $v \notin X$ ;
10  Projdi všechny jeho sousedy, kteří nejsou zakázáni;
11  for  $u \in n(v) \setminus X$  do
12    Pokud do u vede přes v kratší cesta, změň d(u) na její váhu;
13    if  $d(u) > d(v) + w(uv)$  then
14       $d(u) \leftarrow d(v) + w(uv);$ 
15  Po průchodu všech sousedů, zakaž v;
16   $X \leftarrow X \cup \{v\};$ 
17 return  $d;$ 

```

---

**Poznámka.** Pokud bychom chtěli použít Dijkstrův algoritmus na nalezení vzdálenosti mezi dvěma konkrétními vrcholy  $s, t \in V$ , pak stačí `while` cyklus v [pseudokódu výše](#) zastavit v moment, kdy  $t \in X$ . Pak už je totiž známa hodnota  $d_G(s, t)$ , kterou jsme chtěli spočítat.

Povšimněte si, že v tomto případě ještě k naprosté efektivitě Dijkstrova algoritmu krůček schází. Totiž, cestou od  $s$  do  $t$  projde velmi mnoho vrcholů blízkých  $s$ , přes které „víme“, že nejkratší cesta z  $s$  do  $t$  vést nemůže. Algoritmy používané například v GPS aplikacích staví částečně na principu Dijkstrova algoritmu, ale tento nedostatek většinou odstraňují. Jejich popis je však zároveň nad rámec tohoto textu.

**Tvrzení 4.4.1.** Dijkstrův algoritmus je korektní.

**Důkaz.** Musíme ověřit, že Dijkstrův algoritmus je konečný a počítá správně.

Konečnost je zřejmá. Vrchol  $v \in V$  s minimální  $d(v)$  vždy existuje (i kdyby ta hodnota měla být  $\infty$ ), a tedy nastane chvíle, kdy v  $X$  jsou všechny vrcholy grafu  $G$ . V ten moment  $X = V$ , cyklus končí a algoritmus vrací zobrazení  $d$ .

Korektnost ukážeme indukcí podle počtu zakázaných vrcholů, tedy podle  $\#X$ . Naším indukčním předpokladem bude, jako tomu obvykle v důkazech indukcí bývá, že algoritmus funguje. To přesně znamená, že v každém kroku

- (a) je  $d(v) = d_G(s, v)$  pro všechny vrcholy  $v \in X$ ;
- (b) je  $d(u)$  váha nejkratší cesty z  $s$  do  $u$  vedoucí pouze přes vrcholy v  $X$ , pro všechna  $u \in V \setminus X$ .

Předpoklad (a) říká v lidské mluvě, že zakazování vrcholů si opravdu můžeme dovolit, tedy že do zakázaných vrcholů již nejde nalézt kratší cestu.

Význam předpokladu (b) je těžší dekodovat. Představme si spíše, co by se stalo, kdyby **neplatil**. Pak by existovala nějaká kratší cesta do nezakázaného vrcholu  $u$  přes zakázané vrcholy. Ovšem, přesně pro to, že tyto vrcholy jsou již zakázané, nemohu během zbytku průběhu

algoritmu již nikdy tuto cestu objevit. Pokud by se pro nějaký  $u \in V$  stalo, že zrovna tato cesta je tou nejkratší, pak již zároveň nemohu nalézt hodnotu  $d_G(s, u)$  a algoritmus selže.

Počáteční případ  $\#X = 1$  je snadný. V tomto stádiu jsme zrovna zakázali zdrojový vrchol  $s$  a pro každého jeho souseda  $u$  jsme položili  $d(u) = w(su)$ , jelikož  $d(s) = 0$  a  $d(u)$  bývala hodnota  $\infty$ . Tedy, zakázaný vrchol je jediné  $s$  a  $d(s) = d_G(s, s) = 0$ , čímž jsme ověřili platnost (a). Jediné vrcholy, do nichž vede cesta přes zakázané vrcholy, tedy přes vrchol  $s$ , jsou sousedé  $s$ , a váha nejkratší cesty je zřejmě  $w(su)$  pro každého souseda  $u \in n(s)$ . To dokazuje (b).

Nyní předpokládejme, že (a) i (b) platí pro  $X$  a zakažme nějaký zatím nezakázaný vrchol  $u \in V \setminus X$ . Dokážeme nejprve platnost (a). Z indukčního předpokladu platí (a) pro všechny vrcholy  $X$  kromě nově přidaného  $u$ , tedy stačí ukázat, že (a) platí i pro  $u$ .

Dokazujme tedy, že  $d(u) = d_G(s, u)$ . Budeme postupovat sporem. Ať tedy tato rovnost neplatí. Pak existuje nenalezená nejkratší cesta  $\mathcal{P}$  z  $s$  do  $u$  a platí  $w(\mathcal{P}) < d(u)$ . Rozlišíme dva případy.

- (1)  $\mathcal{P}$  prochází nějakými nezakázanými vrcholy.
- (2)  $\mathcal{P}$  neprochází žádným nezakázaným vrcholem (tedy všechny její vrcholy jsou v  $X$ ).

Ať nastala možnost (1). Označme písmenem  $w$  **první nezakázaný** vrchol na cestě  $\mathcal{P}$  (směrem od  $s$ ). Z indukčního předpokladu (b) jsou  $d(w)$  a  $d(u)$  váhy nejkratší cest z  $s$  do  $w$ , resp. z  $s$  do  $u$ , vedoucích jen přes vrcholy z  $X$ . To ale znamená, že  $d(u)$  je aspoň tolik, co  $d(w) +$  váha nejkratší cesty z  $w$  do  $u$ . Protože váha nejkratší cesty z  $w$  do  $u$  je jistě kladné číslo, plyne odtud, že  $d(u) > d(w)$ . Ovšem,  $w$  není zakázaný a algoritmus prochází nezakázané vrcholy postupně od těch s minimální váhou zatím nejkratší známé cesty z  $s$  do nich. Algoritmus navštívil  $u$  dříve než  $w$ , pročez  $d(u) \leq d(w)$ . Pak ale máme

$$d(w) < d(u) \leq d(w),$$

což je zřejmý spor. Vizte [obrázek 47a](#).

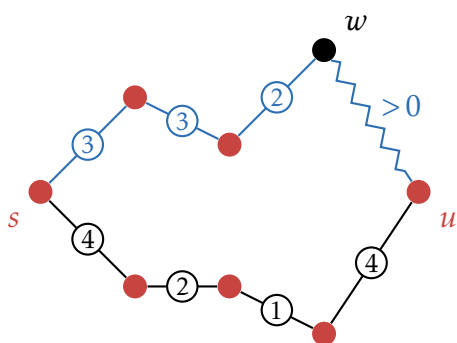
Nyní ať nastala možnost (2). Ať  $w$  je **předposlední** vrchol na cestě  $\mathcal{P}$



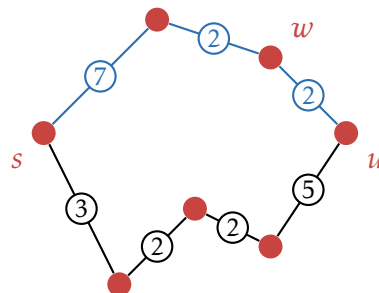
(tedy ten těsně před  $u$ ). Protože  $w$  je zakázaný, platí  $d(w) = d_G(s, w)$  z indukčního předpokladu (a). Pak ale  $w(\mathcal{P}) = d(w) + w(wu) < d(u)$ . To je ovšem spor, protože  $u$  je sousedem  $w$  a  $w$  byl zakázán dříve než  $u$ , a tedy algoritmus měl při procházení sousedů  $w$  nastavit hodnotu  $d(u)$  na  $d(w) + w(wu)$ . Vizte [obrázek 47b](#).

Zbývá ověřit platnost (b) pro  $X \cup \{u\}$ . Z indukčního předpokladu platí (b) pro všechny vrcholy z  $V \setminus X$  kromě sousedů  $u$ , protože pro ty jsme přidáním  $u$  žádnou novou cestu přes zakázané vrcholy nenašli. Pro sousedy  $u$  však platí (b) zřejmě také, protože pokud do nich existuje přes  $u$  kratší cesta, tak u nich algoritmus váhu zatím nejkratší známé cesty z  $s$  změnil na váhu této kratší cesty přes  $u$ .

Tím je důkaz správnosti Dijkstrova algoritmu indukcí podle  $\#X$  dokončen.  $\square$



(a) Příklad (1). Cesta  $\mathcal{P}$  je značena modře. Množina  $X$  červeně. Nemůže nastat, pokud algoritmus běží správně.



(b) Příklad (2). Cesta  $\mathcal{P}$  je značena modře. Množina  $X$  červeně. Nemůže nastat, pokud algoritmus běží správně.

Obrázek 47: Obecný indukční krok v důkazu správnosti [Dijkstrova algoritmu](#).

#### 4.4.2 Hurá na výlet

Sekci o vzdálenosti mezi vrcholy zakončíme popisem algoritmu řešícím [úlohu o rodinném výletu](#). V jeho jádru je nalezení nejkratší cesty mezi zvolenými vrcholy, čili [Dijkstrův algoritmus](#) zde zcela jistě najde své využití. Co ovšem s hospodami? Zadání úlohy stanovuje, že nám nestačí nalézt pouze nejkratší cestu z [Třince](#) do [Orlové](#), nýbrž z množiny všech nejkrat-

ších cest vybrat tu, jež je tak daleko od hospod, jak to jen lze – v tom smyslu, že minimum vzdáleností od vrcholů cesty k hospodám je největší možné.

Poslední věta předchozího odstavce napovídá, že vzdálenost k hospodě máme vnímat jako *vlastnost konkrétního vrcholu*. Zcela jistě není vhodné obě části úlohy (tedy nalezení nejkratší cesty a té, která se nejvíce vyhýbá hospodám) oddělovat. Uvažme totiž případ, kdy **všechny** cesty mezi **Třincem** a **Orlovou** jsou stejně dlouhé. Potom by postup

- (1) Najdi všechny nejkratší cesty.
- (2) Vyber z nich tu nejdál od hospod.

vyžadoval prozkoumání všech možných cest, čemuž se z již párkrát diskutovaných důvodů chceme vyhnout.

Řádově rychlejší postup bude tedy cestu nejdál od hospod hledat současně s tou nejkratší. Abychom toto mohli udělat, musíme znát vzdálenost každého vrcholu od nejbližší hospody. To lze snadno zařídit spuštěním **Dijkstrova algoritmu** vícekrát s každou hospodou jako zdrojovým vrcholem.

Formálně, ať  $H = \{h_1, \dots, h_k\} \subseteq V$  značí množinu hospod. Pro každé  $i \leq k$  máme z výstupu Dijkstrova algoritmu zobrazení  $\theta_i : V \rightarrow [0, \infty]$  takové, že  $\theta_i(v) = d_G(h_i, v)$  pro každý  $v \in V$ . Nyní již snadno využijeme zobrazení  $\theta_i$  k definici zobrazení  $\Theta : V \rightarrow [0, \infty]$ , které značí pro každý vrchol jeho vzdálenost k nejbližší hospodě. Uvědomme si, že stačí definovat

$$\Theta(v) := \min_{i \leq k} \theta_i(v) \quad \forall v \in V.$$

Druhá část řešení bude též spočívat ve spuštění Dijkstrova algoritmu, a-  
však s mírnými úpravami. Zamysleme, jak bychom mohli během jednoho průchodu vrcholem porovnat váhu a vzdálenost od hospody v něm uložených údajů o cestě s těmi o té, po které jsme do něj právě přišli. To ve skutečnosti není vůbec složité. Přeci, primárně nám jde o to najít nejkratší cestu. Vzdálenost k hospodám řešíme až v moment, kdy by dvě různé cesty měly být stejně dlouhé. Stačí pročež vždy nejprve porovnat váhy cest do vrcholu vedoucích, a teprve když se rovnají, porovnat též jejich vzdálenosti k hospodám.

Navíc k zobrazení  $d$  a množině  $X$  (z popisu **Dijkstrova algoritmu**) si u každého vrcholu musíme pamatovat cestu, po které jsme do něj přišli. A k

těmto cestám též jejich vzdálenosti od hospod. Pro tento účel si zavedeme zobrazení  $P : V \rightarrow \bigcup_{i=0}^n V^i$ , čili zobrazení, které každému vrcholu přiřadí  $m$ -tici (pro nějaké  $m \leq n$ ) vrcholů představující cestu, kterou jsem se do něj dostal. Na začátku máme  $P(v) = \emptyset$  pro všechny vrcholy  $v \in V$ . Je-li  $\mathcal{P} = v_1 \cdots v_k$ , pak výrazem  $\mathcal{P} \oplus u$  myslíme cestu  $v_1 \cdots v_k u$ ; pochopitelně pouze za předpokladu, že  $v_k u \in E$ . Konečně, výrazem  $h(\mathcal{P})$  budeme chápat vzdálenost cesty  $\mathcal{P}$  k hospodám, tj. minimum přes všechny vrcholy z jejich vzdáleností k nejbližší hospodě. Formálně

$$h(\mathcal{P}) := \min_{v \in \mathcal{P}} \Theta(v).$$

Zobrazení  $h$  budeme též v průběhu algoritmu vytvářet, neboť v opačném případě bychom museli při vchodu do nového vrcholu pokaždé procházet všechny vrcholy obou porovnávaných cest. Je-li totiž  $\mathcal{P} = v_1 \cdots v_k$  a  $v_k u \in E$ , pak  $h(\mathcal{P} \oplus u)$  je buď  $h(\mathcal{P})$ , pokud je  $u$  od hospod dál než aspoň jeden vrchol v  $\mathcal{P}$ . V opačném případě je  $h(\mathcal{P} \oplus u) = \Theta(u)$ . Souhrnně, vždy máme

$$h(\mathcal{P} \oplus u) = \min(h(\mathcal{P}), \Theta(u)).$$

Přicházíme ke slovnímu popisu řešení [úlohy o rodinném výletu](#). Počáteční vrchol představující město [Třinec](#) značíme  $t$  a koncový vrchol představující město [Orlová](#) značíme  $o$ .

- (1) Polož  $d(t) := 0$  a  $d(v) := \infty$  pro všechny ostatní vrcholy  $v \neq t$ . Dále polož  $X := \emptyset$ ,  $P(t) := t$  a  $P(v) = \emptyset$  pro všechny ostatní vrcholy  $v \neq t$ . Konečně, polož  $h(P(t)) := \Theta(t)$ .
- (2) Vyber libovolný vrchol  $v \in V$  s minimální  $d(v)$ .
- (3) Projdi všechny sousedy  $u$  vrcholu  $v$ , které nejsou v  $X$ .
  - (a) Je-li  $d(u) > d(v) + w(uv)$  nebo
  - (b)  $d(u) = d(v) + w(uv)$  a zároveň  $\min(h(P(u)), \Theta(v)) > h(P(v))$ , pak polož
    - $d(u) := d(v) + w(uv)$ ,
    - $P(u) := P(v) \oplus u$ ,
    - $h(P(u)) := \min(h(P(v)), \Theta(u))$ .
  - (c) V ostatních případech nedělej nic.
- (4) Zakaž vrchol  $v$ , tj. přidej ho do  $X$ .
- (5) Pokud  $o \notin X$ , opakuj bod (2).

**Poznámka.** Bod (3) je jádrem popsaného algoritmu. Lidsky řečeno znamenají jeho body (a) a (b) následující.

- (a) Do  $u$  vede přes  $v$  kratší cesta, než ta zatím známá.
- (b) Do  $u$  vede přes  $v$  stejně dlouhá cesta, jako ta zatím známá, ale navíc je vzdálenost této nové cesty k hospodě větší než vzdálenost k hospodě té zatím známé.

Toto přesně znamená, že primárně nás zajímá váha cesty, sekundárně pak její vzdálenost k hospodě. V obou případech (a) i (b) pak vlastně jenom přepíšeme dosavadní cestu do  $u$ . To jest, zapamatujeme si ji samotnou ( $P(v) \oplus u$ ), její váhu ( $d(v) + w(uv)$ ) a, konečně, její vzdálenost k hospodě; ta zůstane přirozeně stejná, pokud je nějaký vrchol  $P(v)$  blíže k hospodě než  $u$ , v opačném případě se změní na  $\Theta(u)$ , čili na vzdálenost  $u$  k nejbližší hospodě.

Celou sekci završíme **pseudokódem** řešícím trable dědy Koláčka.

**Algoritmus 4: Řešení úlohy o rodinném výletu**

**input** : Souvislý ohodnocený graf  $G = (V, E, w)$ , zdrojový vrchol  $t$ ,  
koncový vrchol  $o$ , podmnožina  $H \subseteq V$  a zobrazení  
 $\Theta : V \rightarrow [0, \infty]$  takové, že  $\Theta(v) = \min_{u \in H} d_G(v, u) \forall v \in V$ .  
**output**: Nejkratší cesta  $P(o)$  mezi  $t$  a  $o$ , její váha  $d(o)$  a její  
vzdálenost k nejbližší hospodě  $h(P(o))$ .

```

1 Inicializace;
2  $d(t) \leftarrow 0$ ;
3  $P(t) \leftarrow t$ ;
4  $h(P(t)) \leftarrow \Theta(t)$ ;
5 for  $v \in V \setminus \{t\}$  do
6    $d(v) \leftarrow \infty$ ;
7    $P(v) \leftarrow \emptyset$ ;
8    $h(P(v)) \leftarrow 0$ ;
9  $X \leftarrow \emptyset$ ;
10 Pokračuj, dokud vrchol  $o$  není zakázaný. Tedy do něj ještě neznáme
    nejkratší cestu;
11 while  $o \notin X$  do
12   Vezmi nezakázaný vrchol s minimální známou vzdáleností;
13    $v \leftarrow$  vrchol takový, že  $d(v) = \min_{u \in V \setminus X} d(u)$  a  $v \notin X$ ;
14   Projdi jeho nezakázané sousedy;
15   for  $u \in n(v) \setminus X$  do
16     Když současná cesta zlepšuje známou vzdálenost od  $t$  nebo ji
        zachovává a zlepšuje vzdálenost od hospod, aktualizuj ji;
17     if  $(d(u) > d(v) + w(uv))$  or
18      $(d(u) = d(v) + w(uv) \text{ and } \min(h(P(v)), \Theta(u)) > P(u))$  then
19        $d(u) \leftarrow d(v) + w(uv)$ ;
20        $P(u) \leftarrow P(v) \oplus u$ ;
21        $h(P(u)) \leftarrow \min(h(P(v)), \Theta(u))$ ;
22     Zakaž vrchol  $v$ ;
23      $X \leftarrow X \cup \{v\}$ ;
24 return  $P(o), d(o), h(P(o))$ ;
```

**Cvičení 4.4.1.** Vyřešte [úlohu o rodinném výletu](#) pro graf daný [obráz-  
kem 45](#).

## 4.5 Graf jako algebraická struktura

Snad poněkud tajemný název sekce v sobě skrývá jiný pohled na graf, než jsme chovali doposud. Mimo jejich využití v modelování systémů, které lze reprezentovat jako síť uzlů a spojnic, jsou grafy též velmi užitečné ve více „abstraktních“ údech matematiky. Představují totiž v jistém smyslu *nejvolnější* strukturu na množině, která je vůbec ještě užitečná.

Abychom osvětlili, co tímto výrokem míníme, uvážíme *ještě další* pohled na hrany grafu  $G$ . Záměrně jsme teď neuvedli množinu hran, neb o nich vůbec nechceme takto přemýšlet. Samozřejmě, stále potřebujeme mít nějakou množinu  $V$ , na níž onu strukturu stavíme; tu někdy přezdívkou *bázovou*, protože skutečně tvoří jakýsi „základ“ sestrojené struktury.

Intuitivně je příjemné nahlížet na množinové struktury jako na stavebnice. Bázová množina jsou její díly (každý máme k dispozici, kolikrát chceme) a způsob, kterým do sebe díly zapadají, je právě ona struktura.

Aniž si to pravděpodobně uvědomujete, narazili jste už v matematice na celou řadu struktur. Jako příklad uveďme množinu celých čísel  $\mathbb{Z}$  s operací násobení. Zde  $\mathbb{Z}$  je bázová množina a operace  $\cdot$  je struktura na  $\mathbb{Z}$ . Definuje *jeden možný způsob*, jak do sebe díly nazvané celá čísla zapadají. Možná jste někdy přemýšleli o tom, co vlastně znamená slovo „operace“. V případě  $\cdot$  hovoříme o **binární** operaci, tedy o operaci na **dvou prvcích**. Přirozeně, nic nám nebrání definovat si operace na libovolném počtu celých čísel. Asi nejvíce přímočarý způsob, jak definovat (binární) operaci, je přes zobrazení. Čili,  $\cdot$  je zobrazení

$$\cdot : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z},$$

které každou dvojici  $(x, y) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$  zobrazí na  $x \cdot y$ .

Zkusme teď podobným způsobem definovat hrany na množině  $V$ . Binární operace na  $V$  by znamenala zobrazení  $V \times V \rightarrow V$ , tedy zobrazení, jež dvěma vrcholům přiřadí třetí vrchol. To asi není v tomto případě příliš směřodonné. Hrany však vždy existují mezi dvěma vrcholy, tedy volba množiny  $V \times V$  jako domény se zdá smysluplná. Otázkou je, co má být kodoménu. Jedna možnost by byla opravdu uvážit nějakou další množinu hran  $E$  a směřovat zobrazení do ní. Tento pohled je vlastně opačný k našemu [třetímu pojetí grafu](#). Místo toho, abychom přiřazovali dva vrcholy jedné hraně, tak přiřazujeme hranu páru vrcholů.

Existuje však mnohem přímější způsob. Přeci, abych dal najevo, že mezi párem vrcholů vede hrana, nemusím vybírat žádnou *konkrétní* hranu z předem definované množiny. Všechny hrany jsou stejné! Stačí mi si pouze u každých dvou vrcholů pamatovat, jestli mezi nimi vede hrana, či nikoliv. To jest, stačí mi libovolná dvouprvková podmnožina, jejíž jeden prvek znamená „Mezi těmito vrcholy nevede hrana,“ a ten druhý naopak „Mezi těmito vrcholy hrana vede“.

Obvyklou volbou (zvláště v informatice) je množina  $\{0, 1\}$ , kde 0 tradičně značí, že hrana neexistuje, a 1, že ano. Příznivci čisté logiky možná uvítají množinu  $\{\perp, \top\}$ , kde  $\perp$  je logická konstanta „lež“ a  $\top$  je logická konstanta „pravda“. My se budeme držet čtenářům spíše přirozenější volby,  $\{0, 1\}$ .

Čili, *hranami* mezi vrcholy z množiny  $V$  myslíme strukturu na  $V$  danou zobrazením

$$\varepsilon : V \times V \rightarrow \{0, 1\}.$$

Konečně vysvětlíme, co myslíme tím, že takováto struktura je v podstatě nejvolnější možná. Totiž, když pro libovolnou dvojici  $v, w \in V$  změním obraz  $\varepsilon(v, w)$  třeba z 0 na 1, stále tím dostaneme validní strukturu hran na  $V$  ve smyslu svojí definice. Čili, **úplně každé** zobrazení  $V \times V \rightarrow \{0, 1\}$  postaví strukturu na množině  $V$ . To je intuitivně ekvivalentní tomu, že každé dva díly stavebnice do sebe zapadají jakýmkoli způsobem. Je zřejmé, že „volnější“ stavebnice než taková už neexistuje.

Naopak, vraťme se k příkladu celých čísel s operací násobení. Co by se stalo, kdybychom se ráno vzbudili a rozhodli se, že odteď  $2 \cdot 3 = 5$ , ale veškeré ostatní vlastnosti násobení (jako třeba i komutativita a asociativita) zůstanou beze změny? Tato jedna úprava by zcela rozbourala celou strukturu násobení na  $\mathbb{Z}$ , protože najednou by například nebylo možné definovat sudá a lichá čísla (2 by dělila všechny násobky 5), 6 by byla prvočíslo (její rozklad býval  $2 \cdot 3$ ), 10 by se rovnalo 12, jelikož

$$10 = 2 \cdot 5 = 2 \cdot (2 \cdot 3) = (2 \cdot 2) \cdot 3 = 4 \cdot 3 = 12,$$

a způsobila nekonečně mnoho dalších trhlin. Intuitivně, násobení na  $\mathbb{Z}$  je stavebnice, kde do sebe každé dva díly zapadají přesně jediným způsobem.

Po tomto neformálním úvodu se na chvíli ponoříme do hlubin struktury zvané *graf*, povíme si, co znamená „podstruktura“, že graf se dá též vnímat jako prostor, a že můžeme přes zobrazení skákat mezi různými grafy.



V následujícím nemusíme hovořit o hranách jako o zobrazení  $\varepsilon : V \times V \rightarrow \{0, 1\}$  popsaném výše. Naše původní představa množiny  $E$  postačuje. Není však špatné tuto myšlenku uchovat v hlavě, k čemuž slouží následující, extrémně snadné, cvičení.

**Cvičení 4.5.1.** Rozmyslete si, jak upravit zobrazení

$$\varepsilon : V \times V \rightarrow \{0, 1\}$$

definující hranovou strukturu na množině vrcholů tak, aby zahrnovalo i všechny **ohodnocené** grafy.

#### 4.5.1 Podgrafy, souvislost a metrika

V této relativně krátké podsekci dáme formální tvář představě, že

- (1) nějaký graf je „uvnitř“ druhého;
- (2) graf je souvislý a rozpadá se na tzv. *komponenty souvislosti*, tedy maximální souvislé části;
- (3) graf je *metrický* prostor, tedy prostor, ve kterém lze měřit vzdálenosti.

Začneme bodem (1), vedoucím na pojem *podgrafu*. Jeho definice je opravdu nejjednodušší možná, požadujeme pouze, aby vrcholy a hrany podgrafu tvořili podmnožinu vrcholů a hran většího grafu.

**Definice 4.5.1 (Podgraf).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Řekneme, že graf  $H = (V', E')$  je *podgrafem*  $G$ , pokud

$$V' \subseteq V \quad \text{a} \quad E' \subseteq E.$$

**Poznámka.** Žádáme čtenáře, aby sobě povšimli, že podgraf **nemusí zachovat** hranovou strukturu svého nadgrafu. Přesněji, **definice podgrafu** neobsahuje podmínku, že mezi vrcholy  $H$  musí vést hrana, pokud mezi těmi samými vrcholy v  $G$  hrana vedla.

Taková definice je z pohledu algebraika zhora zbytečná, bať odpudivá. Hranová struktura je zásadní součástí definice grafu a měla by být dodržena. Z tohoto důvodu se nehodí říkat, že by podgraf byl *podstrukturou* svého nadgrafu, kterakžekolivěk vágně je ono slovo vyloženo.

Předchozí poznámka motivuje definici *indukovaného podgrafu*, podgrafu, jemuž je přikázáno původní strukturu zachovat. Žargonový výraz „indukovaný“ v tomto kontextu obvykle znamená přibližně „plynoucí z“. Čili, indukovaný podgraf je podgraf, jehož struktura **plyne ze** struktury vyššího grafu.

Tuto podmínku lze formulovat snadno. Díváme-li se na hrany jako na podmnožiny systému dvouprvkových podmnožin  $V$ , tedy jako na množinu  $E \subseteq \binom{V}{2}$ , pak požadavek, aby nějaký podgraf  $H = (V', E')$  grafu  $G = (V, E)$  obsahoval spolu s každou dvojicí vrcholů i hranu mezi nimi, pokud je v  $E$ , lze vyjádřit zkrátka tak, že nařídíme, aby  $E' = E \cap \binom{V'}{2}$ , tedy aby  $E'$  byla vlastně množina  $E$ , ve které necháme jen ty hrany, které vedou mezi vrcholy z  $V'$ .

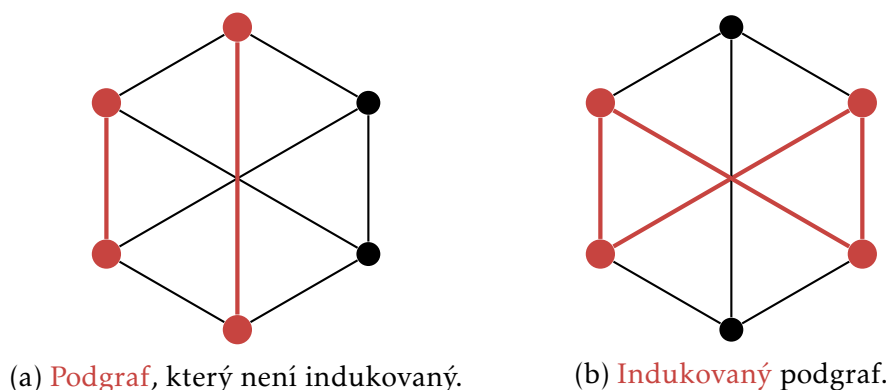
**Definice 4.5.2 (Indukovaný podgraf).** Ať  $G = (V, E)$  je graf a  $H = (V', E')$  jeho podgraf. Řekneme, že  $H$  je *indukovaný* (grafem  $G$ ), pokud **zachovává hranovou strukturu na  $G$** , to jest,

$$E' = E \cap \binom{V'}{2}.$$

**Poznámka.** Je dlužno nahlédnout, že indukovaný podgraf grafu  $G = (V, E)$  je jednoznačně určen svoji množinou vrcholů. Totiž, vyberu-li z  $V$  podmnožinu  $V'$ , pak mezi všemi vrcholy z  $V'$  musejí v indukovaném podgrafu vést všechny hrany, které mezi nimi vedou i v původním grafu. Množina  $E'$  je tudíž kompletně popsána množinami  $V'$  a  $E$ .

Každý graf se přirozeně rozkládá na své maximální souvislé indukované podgrafy, tzv. *komponenty souvislosti*. Toto slovo jsme zde zmínili mnohokrát v různých kontextech, však vždy bez řádné definice. Důvodem je fakt, že samotná definice komponent souvislosti není zcela bez práce.

Nabízejí se dva přirozené přístupy, jejichž ekvivalenci si postupně uká-

Obrázek 48: Rozdíl mezi podgrafem a *indukovaným* podgrafem.

žeme. První, snad více infromatický přístup, je definovat komponentu souvislosti jako **maximální souvislý podgraf**, tedy takový (indukovaný) podgraf, mezi každým párem jehož vrcholů vede cesta a je největší takový; to jest, k žádnému z ostatních vrcholů vyššího grafu z vrcholů tohoto podgrafu cesta nevede. Tento postup jsme nazvali *infromatickým*, neb popisuje, jak se algoritmicky komponenty souvislosti v grafu hledají. Zkrátka tak, že začneme v libovolném vrcholu, pokračujeme z něj do jeho sousedů a pak zase do jejich sousedů tak dlouho, dokud to lze. V moment, kdy už se nikam dál z původního vrcholu nemůžeme dostat, našli jsme tu **jednu** komponentu souvislosti, která obsahuje počáteční vrchol.

Druhý přirozený přístup je ryze matematický a algoritmicky obtížně realizovatelný. Zase je výhodný pro svou explicitnost a snadné využití v důkazech. Obvyklý způsob, jak rozdělit množinu (v tomto případě množinu vrcholů,  $V$ ) na podmnožiny, je užitím **tříd ekvivalence**. Protože dva vrcholy leží ve stejné komponentě souvislosti právě tehdy, když mezi nimi vede cesta, nabízí se pro rozkouskování množiny využít právě relaci „býti cestou mezi vrcholy“. Jediný problém dlí v tom, že není na první pohled zřejmé, jedná-li se o ekvivalenci.

Definujme na množině vrcholů  $V$  grafu  $G = (V, E)$  relaci  $\sim$  předpisem

$$u \sim v \Leftrightarrow \text{v } G \text{ vede cesta mezi } u \text{ a } v.$$

Dokážeme si, že  $\sim$  je ekvivalence.

**Lemma 4.5.3.** Ať  $G = (V, E)$  je graf a  $\sim$  je relace na  $V$  dána výše. Pak  $\sim$  je ekvivalence na  $V$ .

**Důkaz.** Dle [definice ekvivalence](#) potřebujeme ověřit, že  $\sim$  je

- (a) reflexivní, čili  $v \sim v \ \forall v \in V$ ;
- (b) symetrická, čili  $u \sim v \Rightarrow v \sim u \ \forall u, v \in V$ ;
- (c) transitivní, čili  $u \sim v \wedge v \sim w \Rightarrow u \sim w$  pro všechny  $u, v, w \in V$ .

Body (a) a (b) jsou v zásadě triviální. Pro každé  $v \in V$  platí  $v \sim v$ , protože samotný vrchol je z [definice](#) též cesta. To dokazuje (a). Pro důkaz (b) ať  $u \sim v$  a  $u = v_0 v_1 \cdots v_n = v$  je cesta z  $u$  do  $v$ . Pak  $v = v_n v_{n-1} \cdots v_1 v_0 = u$  je cesta z  $v$  do  $u$ , a tedy  $v \sim u$ .

Jediný důkaz (c) není samozřejmý. Pro nabytí intuice vizte [obrázek 49](#). Uvědomme si, že **spojení cest není vždy cesta**. Jeho princip spočívá v tom, že máme-li danu cestu  $u = u_0 u_1 \cdots u_n = v$  z  $u$  do  $v$  a cestu  $v = v_0 v_1 \cdots v_m = w$  z  $v$  do  $w$ , pak jdeme po první cestě tak dlouho, dokud nenarazíme na tu druhou. Tu pak následujeme až do  $w$ . Formálně, ať  $k \leq n$  je **nejmenší** takové, že  $u_k$  leží na cestě mezi  $v$  a  $w$ . Takové  $k$  musí existovat, protože zcela jistě přinejmenším vrchol  $v$  leží jak na cestě z  $u$  do  $v$ , tak na cestě z  $v$  do  $w$ . Ať  $j \leq m$  je index takový, že  $u_k = v_j$ . První cestu budeme následovat až do  $u_k = v_j$  a potom budeme pokračovat po cestě druhé. V symbolech, kýžená cesta mezi  $u$  a  $w$  je v takovém případě

$$(u = u_0)u_1 \cdots u_{k-1}(u_k = v_j)v_{j+1} \cdots (v_n = w).$$

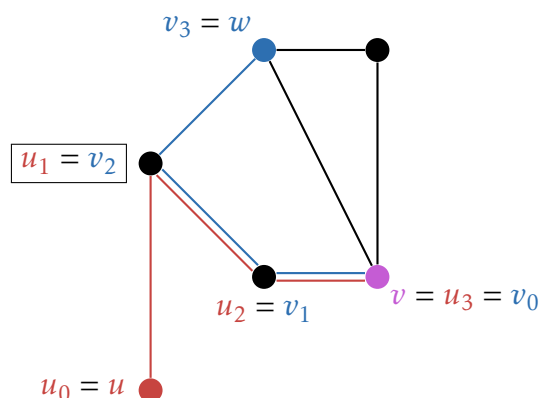
Tím je důkaz transitivity  $\sim$  hotov. □

Předchozí lemma opravňuje následující definici *komponenty souvislosti*.

**Definice 4.5.4 (Komponenta souvislosti).** Ať  $G = (V, E)$  je graf,  $\sim$  je ekvivalence na  $V$  z [lemmatu 4.5.3](#) a

$$V = \bigcup_{i=1}^n V_i$$

je rozklad  $V$  na  $n \in \mathbb{N}$  tříd ekvivalence  $V_i$  podle  $\sim$ . Indukované pod-



Obrázek 49: Cesta  $u_0(u_1 = v_2)v_3$  mezi  $u$  a  $w$  sestavená z cesty  $u_0u_1u_2u_3$  mezi  $u$  a  $v$  a z cesty  $v_0v_1v_2v_3$  mezi  $v$  a  $w$ . Zde  $k = 1$  a  $j = 2$ .

grafy  $G_i = (V_i, E \cap \binom{V_i}{2})$  nazýváme *komponenty souvislosti* grafu  $G$ .

**Poznámka.** Připomínáme, že rozklad na třídy ekvivalence

$$V = \bigcup_{i=1}^n V_i$$

znamená, že  $V$  má podle  $\sim$  přesně  $n$  tříd ekvivalence, pro každé  $i \leq n$  existuje vrchol  $v_i \in V$  takový, že

$$V_i = \{u \in V \mid u \sim v_i\},$$

tedy  $V_i$  je množina všech vrcholů, do nichž vede cesta z  $v_i$ , a  $V_i \cap V_j = \emptyset$  pro každý pár  $i \neq j$ , to jest z  $v_i$  do  $v_j$  nevede žádná cesta.

**Pozorování.** Komponenty souvislosti  $G_i$  grafu  $G$  z [definice výše](#) jsou právě všechny maximální souvislé indukované podgrafy grafu  $G$ .

**Důkaz.** Dokazujeme dvě implikace.

Nejprve ať  $G_i$  je nějaká komponenta souvislosti  $G$ . Podgraf  $G_i$  je zřejmě indukovaný a souvislý z definice. Pro spor ať existuje vrchol  $v \notin V_i$ , do kterého vede cesta z nějakého vrcholu  $u \in V_i$ . Spor máme okamžitě,

neboť  $V_i$  z definice obsahuje všechny vrcholy, do nichž vede cesta z  $u$ .

Naopak, ať  $H = (V', E')$  je maximální indukovaný souvislý podgraf  $G$ . Vezměme libovolný  $v \in V'$ . Pak je ale  $H = [v]_{\sim}$ , tedy třída ekvivalence  $\sim$  obsahující  $v$ . Vskutku, z maximality  $H$  platí  $u \in H$ , kdykoli  $v \sim u$ . Protože sjednocení všech  $V_i$  je množina vrcholů  $V$  a tyto  $V_i$  jsou po dvou disjunktní, existuje nutně přesně jedno  $i \leq n$  takové, že  $v \in V_i$ . Pak  $H = V_i$ .  $\square$

Další zajímavou strukturální vlastností grafu je, že tvoří prostor. Než specifikujeme, co tím míníme, odkročíme na chvíli a rozhovoříme se o tom, čemuže vlastně matematik řekne *prostor*.

Naši intuitivní představu prostoru splňují tzv. *normované vektorové prostory*, kde je definována velikost a směr (a tím i vzdálenost a úhel). Velikosti i směry se dají sčítat a velikosti navíc násobit. Můžeme také hovořit o jejich dimenzi. Obecně, normovaný vektorový prostor je určitě ten nejjednodušší typ matematického prostoru, který aproximuje vesmír.

Existují však mnohem primitivnější prostory, které nemají zdaleka tolik „přirozených“ vlastností. Mezi ně patří tzv. *topologické* prostory, které mají jen to nejzákladnější, co chceme po úplně každém typu prostoru – tvar. O něco málo složitější jsou prostory *metrické*, kde lze měřit vzdálenost; nikoli však nutně velikost nebo směr. Jak si nyní povíme, grafy přirozeně nabývají struktury metrických prostorů. To je snadné dokázat. Výrazně těžší je dokázat (a dělat to nebudeme), že ve skutečnosti metrické prostory jsou ty nejsložitější prostory, kterými grafy mohou být. Vektorové prostory to nikdy nejsou, bez ohledu na zvolenou definici sčítání či násobení.

Pojďme tedy provést stručnou diskusi metrických prostorů. Snad už čtenářům nezpůsobuje překvapení, že „měření“ vzdáleností v našem prostoru zajišťuje vhodně zvolené zobrazení. Samotný prostor je v principu libovolná množina se strukturou danou právě tímto zobrazením. Měření vzdáleností mezi párem jejích prvků probíhá přiřazením nezáporné hodnoty (klidně i  $\infty$ ) tomuto páru. Je ještě nutné, aby měření splňovalo pár přirozených podmínek, které uvedeme v následující definici a záhy osvětlíme.

**Definice 4.5.5 (Metrika).** Ať  $X$  je množina. Zobrazení  $\mu : X \times X \rightarrow [0, \infty]$  nazveme *metrikou* na  $X$ , pokud

- (a)  $\mu(x, x) = 0 \ \forall x \in X$ ,
- (b)  $\mu(x, y) = \mu(y, x) \ \forall x, y \in X$ ,
- (c) (trojúhelníková nerovnost)  $\mu(x, y) + \mu(y, z) \leq \mu(x, z) \ \forall x, y, z \in X$ .

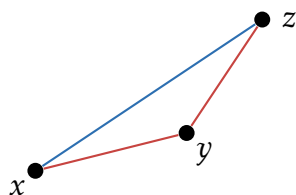
**Definice 4.5.6 (Metrický prostor).** Dvojici  $(X, \mu)$ , kde  $X$  je množina a  $\mu$  je metrika na  $X$  nazveme *metrický prostor*.

**Poznámka.** Přeložíme podmínky (a), (b) a (c) [definice metriky](#) do lidské řeči. O prvcích  $X$  můžeme bez okolek hovořit jako o „bodech“ v prostoru.

Podmínka (a) vyžaduje, aby žádný bod nebyl sám od sebe vzdálen. Bez ní bychom měli problém intuitivně definovat vzdálenost dvou různých bodů, neboť bych se mohl do počátečního bodu opakovaně vracet a zvyšovat tím vzdálenost od něj k bodům ostatním.

Podmínka (b) říká, že  $x$  je od  $y$  stejně daleko jako  $y$  od  $x$ . To je asi přirozená podmínka i bez bližšího vysvětlení.

Konečně, podmínka (c) říká, že když jdu z  $x$  do  $z$ , pak jakákoli „zacházka“ do bodu  $y$  nemůže délku cesty zkrátit. Tato podmínka opět zní velmi přirozeně a skutečně, bez ní by definice vzdálenosti opět nedávala intuitivní smysl. Jak by se mohlo stát, že by úsečka nebyla nejkratší spojnici mezi dvěma body? Původ názvu „trojúhelníková nerovnost“ této podmínky osvětluje [obrázek 50](#).



Obrázek 50: Trojúhelníková nerovnost

My ale přeci umíme měřit vzdálenosti v grafu! Pro dva vrcholy  $u, v \in V$  jsme si [definovali](#) vzdálenost  $u$  od  $v$  jako váhu nejkratší cesty mezi  $u$  a  $v$ . V případě, že  $G$  je neohodnocený, předpokládáme implicitně, že váha každé hrany je 1, tedy váha cesty je v tomto případě totožná s její *délkou*,

počtem jejich hran.

Ukážeme, že množina vrcholů  $V$  grafu  $G = (V, E)$  spolu se zobrazením

$$d_G : V \times V \rightarrow [0, \infty],$$

které každým dvěma vrcholům přiřadí jejich vzdálenost, je metrický prostor. To plyne okamžitě z následujícího lemmatu.

**Lemma 4.5.7.** Ať  $G = (V, E)$  je graf a  $d_G(u, v)$  značí vzdálenost, tj. *délku* nejkratší cesty, mezi  $u$  a  $v$  pro každé dva  $u, v \in V$ . Pak je  $d_G$  metrika na  $V$ .

**Důkaz.** Pro důkaz potřebujeme ověřit, že podmínky z [definice metriky](#) platí pro  $d_G$ .

Podmínky (a) a (b) platí triviálně. Cesta z  $v$  do  $v$  obsahuje přesně jenom samotný vrchol  $v$ , tudíž nemá žádné hrany a její délka je 0. To znamená, že  $d_G(v, v) = 0$  pro každý  $v \in V$ . Dále, jest-li  $e_1 e_2 \cdots e_n$  cesta z  $u$  do  $v$ , kde  $e_i \in E$ , pak  $e_n e_{n-1} \cdots e_1$  je cesta z  $v$  do  $u$  zřejmě rovněž délky  $n$ . To dokazuje vztah  $d_G(u, v) = d_G(v, u)$ .

Pokračujme trojúhelníkovou nerovností (c). Ať  $u = u_1 u_2 \cdots u_{n+1} = v$  je cesta mezi  $u$  a  $v$  délky  $n \in \mathbb{N}$  a  $v = v_1 v_2 \cdots v_{m+1} = w$  cesta mezi  $v$  a  $w$  délky  $m \in \mathbb{N}$ . Podle důkazu [lemmatu 4.5.3](#) existují  $j, k \in \mathbb{N}$  taková, že  $u_k = v_j$  a  $u_1 u_2 \cdots u_k v_{j+1} v_{j+2} \cdots v_m$  je cesta mezi  $u$  a  $w$ . To ovšem znamená, že délka **nejkratší** cesty mezi  $u$  a  $w$  má nejvýš tolik hran, kolik cesta  $u_1 u_2 \cdots u_k v_{j+1} \cdots v_{m+1}$ , která jich má přesně  $(k-1) + (m-j)$ . Protože  $k-1 \leq n$  a  $m-j \leq m$ , získáváme nerovnost

$$d_G(u, w) \leq (k-1) + (m-j) \leq n + m = d_G(u, v) + d_G(v, w),$$

čímž je důkaz dokončen. □

Podsekcí uzavřeme pár cvičeními.

**Cvičení 4.5.2 (těžké).** Kolik nejvíce hran může mít graf s  $n$  a  $k$  komponentami souvislosti?



**Cvičení 4.5.3.** Ať  $V$  je **konečná** množina a  $d : V \times V \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  je metrika na  $V$ . Dokažte, že pak existuje graf  $G = (V, E)$  takový, že  $d_G(u, v) = d(u, v)$  pro všechny  $u, v \in V$ .

**Cvičení 4.5.4.** Navrhněte efektivní algoritmus, který pro zadaný graf  $G = (V, E)$  rozhodne, zda je souvislý, a pokud není, najde jeho rozklad na komponenty souvislosti.

### 4.5.2 Grafové homomorfismy

Trochu času věnujeme přemýšlení o tom, co může znamenat *zobrazení* mezi grafy. Tato podsekce má primárně být jakýmsi úvodem do abstraktní algebry, kde zaujímají zobrazení mezi strukturami snad největšího významu. O homomorfismech grafů se dle názoru autora hovoří spíše okrajově a aplikací nejsou přehrášle.

Ať tedy  $G = (V_G, E_G)$  a  $H = (V_H, E_H)$  jsou dva grafy. Zápis  $\varphi : G \rightarrow H$ , tj. zobrazení z  $G$  do  $H$ , sice smysl dává, neb  $G$  a  $H$  jsou (jako všechno v teorii množin) též množiny, ale není pro rozvoj teorie nijak zajímavý. Takové zobrazení totiž může klidně posílat třeba hrany v  $G$  na vrcholy v  $H$  a tvořit jiné podobné zrudnosti.

V celé sekci se díváme na graf jako na množinu vrcholů se strukturou danou hranami. Tenhle pohled zůstává užitečným i nyní. Totiž, *homomorfismem* (z řec. homós, „stejný“, a morphé, „tvar, forma“) mezi obecně množinami se strukturou se myslí **zobrazení mezi těmito množinami, které zachovává strukturu**.

V případě grafů toto znamená, že *homomorfismus*  $\varphi : G \rightarrow H$  je zobrazení  $\varphi_V : V_G \rightarrow V_H$  z vrcholů  $G$  do vrcholů  $H$ , které „zachovává“ hrany. To je lze vyložit zkrátka tak, že když mezi vrcholy v  $G$  vede hrana, tak mezi jejich obrazy při zobrazení  $\varphi_V$  vede též hrana.

**Definice 4.5.8 (Grafový homomorfismus).** Buďtež  $G = (V_G, E_G)$  a  $H = (V_H, E_H)$  dva grafy. *Homomorfismem* z  $G$  do  $H$ , značeným běžně  $\varphi$  :

$G \rightarrow H$ , myslíme zobrazení

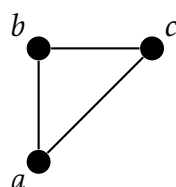
$$\varphi_V : V_G \rightarrow V_H$$

takové, že

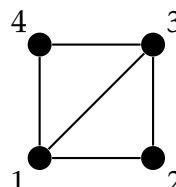
$$(u, v) \in E_G \Rightarrow (\varphi_V(u), \varphi_V(v)) \in E_H.$$

Obvykle, bo jest tomu buřt, ztotožňujeme homomorfismus  $\varphi : G \rightarrow H$  se zobrazením  $\varphi_V : V_G \rightarrow V_H$  mezi bázovými množinami a oboje značíme zkrátka  $\varphi$ .

Ona definice skýtá jistý problém. Uvažme grafy  $G$  a  $H$  dané [obrázkem 51](#).



(a) Graf  $G$ .



(b) Graf  $H$ .

Obrázek 51: Problém s definicí homomorfismu  $G \rightarrow H$ .

Zde  $V_G = \{a, b, c\}$  a  $V_H = \{1, 2, 3, 4\}$ . Jeden možný homomorfismus  $G \rightarrow H$  je třeba dán zobrazením  $\varphi : V_G \rightarrow V_H$  takovým, že

$$\varphi(a) = 1,$$

$$\varphi(b) = 4,$$

$$\varphi(c) = 3.$$

Pak je opravdu splněna podmínka z [definice 4.5.8](#), neboť mezi každými dvěma vrcholoma z  $a, b, c$  vede hrana a mezi každými dvěma vrcholoma z  $1, 4, 3$  rovněž vede hrana.

Uvažme však jen trochu jiný homomorfismus  $\psi : G \rightarrow H$ , který je dán rovnostmi

$$\psi(a) = 1,$$

$$\psi(b) = 3,$$

$$\psi(c) = 3;$$

čili vlastně „slepuje“ vrcholy  $b$  a  $c$  do vrcholu 3. Všimněte si, že takovéto zobrazení není podle [definice 4.5.8](#) homomorfismem. Hrany  $(a, b)$  a  $(a, c)$

jsou sice zachovány, ale podmínka z téže definice pro hranu  $(b, c)$  říká, že

$$(b, c) \in E_G \Rightarrow (\psi(b), \psi(c)) = (3, 3) \in E_H,$$

což zřejmě nelze, neboť podle naší [první definice grafu](#) je  $E$  relace na  $V$ , která je symetrická a **antireflexivní**, což znamená, že v grafu nepovolujeme smyčky, kterou by  $(3, 3)$  jistě byla.

Tato peripetie má několik možných katastrof. V zájmu rozvoje matematického myšlení čtenářů si které si rozebereme.

- (1) Nic nerobit, držet se původní definice a nepovažovat  $\psi$  za homomorfismus. To je jistě jedno možné řešení a vyniká množstvím potřebné práce k jeho dosažení. Lidsky řečeno vlastně znamená, že slepovat vrcholy mohou jediné tehdy, když mezi nimi nevede hrana. Toto řešení je zároveň nejvíce omezující.
- (2) Modifikovat [definici homomorfismu](#) tak, aby ignorovala tyto případy. Tedy, upravit podmínku zachování hran následovně:

$$((u, v) \in E_G \wedge \psi(u) \neq \psi(v)) \Rightarrow (\psi(u), \psi(v)) \in E_H.$$

Takové řešení je *extrémně nepřírozené*. Totiž, když z grafu  $H$  na [obrázku 51b](#) vynecháme hranu  $(b, c)$  a homomorfismus  $\psi$  ponecháme beze změny, pak je v obou případech (tedy s hranou  $(b, c)$  i bez ní) obrazem grafu  $H$  v  $G$  úsečka 13. Byť obrazy dvou různých grafů stejným homomorfismem byly stejné, jesti algebraicky nepřijatelné.

- (3) Zvolnit definici grafu tak, aby povolovala smyčky. To by znamenalo konkrétně odstranit z [první definice grafu](#) podmínku antireflexivity relace  $E$ . Zůstala by tedy pouze symetrickou a dvojice  $(v, v)$  pro  $v \in V$  by byly smyčkami. Ovšem, [druhá definice grafů](#) by se stala nepoužitelnou, neboť dvouprvková podmnožina  $V$  nemůže obsahovat dvakrát týž prvek. Z [třetí definice grafu](#) by stačilo rovněž odstranit pouze podmínku (a) zakazující shodnost zdroje a cíle téže hrany.

Při adopci tohoto řešení by graf  $G$  musel obsahovat smyčku  $(3, 3)$ , aby mohl předpis  $\psi$  zůstat beze změny. V takovém případě by obrazem grafu  $H$  **bez** hrany  $(b, c)$  byla opět úsečka 13, ale obrazem grafu  $H$  **se** hranou  $(b, c)$  by byla úsečka 13 spolu se smyčkou na vrcholu 3.

Obě řešení (1) i (3) jsou rozumná a v různých situacích různě užitečná. Dle naší zkušenosti je operace „slepení“ vrcholu příliš důležitá pro práci s grafovou strukturou a pročež je spíše dáváno přednost řešení (3). Ovšem,

jistě existují aplikace, kdež mají homomorfismy své místo, ale přesto jsou smyčky nežádoucí.

Podsekcí kvapně zakončíme zcela bezvýznamnou definicí. Účel jejího zařazení dlí, podobně jako zbytku podsekcce, v prezentaci a povrchovém prozkoumání pojmu *homomorfismu*.

Homomorfismy mimořádných vlastností (jako prostota, surjektivita) mají své vlastní názvy, které zde pro pořádek uvedeme. Reálně nás v dalším textu bude zajímat ovšem jedině pojem *isomorfismu*, bijektivního homomorfismu.

**Definice 4.5.9.** Ať  $\varphi : G \rightarrow H$  je homomorfismus grafů. Je-li

- $\varphi$  prostý, pak sluje **monomorfismus** (z řec. mono-, „jeden, jediný“);
- $\varphi$  na, pak sluje **epimorfismus** (z řec. epi-, „nad, přes, na“);
- $\varphi$  bijekce, pak sluje **isomorfismus** (z řec. iso-, „roven“);
- $H = G$ , pak sluje **endomorfismus** (z řec. éndon, „vnitřek, vnitřní“);
- $\varphi$  endomorfismus a isomorfismus, pak sluje **automorfismus** (z řec. auto-, „sebe-“).

**Poznámka.** Je-li  $\varphi : G \rightarrow H$  isomorfismus, pak je to speciálně bijekce  $V_G \rightarrow V_H$ , tedy  $\#V_G = \#V_H$  a graf  $H$  je vlastně graf  $G$  s přejmenovanými vrcholy.

Je-li  $\varphi : G \rightarrow G$  automorfismus, pak je to speciálně permutace na  $V_G$ , čili vlastně jen proházení vrcholů  $G$ .

## 4.6 Kreslení grafů

Čtenáře může překvapit, že *kreslení* grafů je matematicky formální postup. Na druhou stranu to však divné není, neboť mnoho aplikací grafů plyne právě z přirozeného vnímání této struktury jako množiny bodů v rovině spojených úsečkami.

Naši zábavou v této závěrečné sekci bude prezentovat onen postup a po té se rozhovoříme o tzv. *rovinných* grafech; grafech, jež lze nakreslit, aniž se křivky představující úsečky v rovině kříží.

Více prakticky orientované čtenáře, kterým, stejně jako i ostatním vedlejším vrstvám akademické komunity, je tento text samozřejmě též určen, by snad zajímalo, k čemu je kreslení grafů dobré.

Jedním konkrétním příkladem ze stavby počítačů je návrh logických obvodů v procesorech. Je v zájmu výrobců procesorů snížit počet křížení logických obvodů na naprosté minimum, neboť každé křížení znamená nutnost zvýšit procesor o další vrstvu zlata a silikonu, což zhoršuje rychlost přenosu dat a zvedá cenu výroby.

Více matematické aplikace pak zahrnují mimo mnohé další například (stále nevyřešený!) [Brick Factory Problem](#) nebo též [různé úlohy v teorii uzlů](#).

První netriviální výzvou je dojít k rozumné definici kreslení grafu. Potřebujeme nějakým způsobem přenést množinu vrcholů  $V$  grafu  $G$  na body v rovině a množinu hran  $E$  na křivky spojující tyto body. Záměrně jsme použili slovo „křivka“ místo „úsečka“, neboť není těžké si rozmyslet, že mnoho grafů lze nakreslit bez křížení hran, pokud tyto kreslíme jako křivky či oblouky, ale nikoli kreslíme-li je jako úsečky.

Doufáme, že čtenáři jsou si touto dobou již dostatečně navykli na způsob formalizace vágních pojmů typu *přenést*, *vnímat jako*, *interpretovat* apod. Všechny obvykle vedou k zobrazení. Tak je tomu i nyní. Zkrátka, množinu vrcholů  $V$  grafu  $G = (V, E)$  **zobrazíme** do roviny a množinu hran  $E$  zobrazíme do jakési množiny **křivek** v rovině, kterýžto pojem se právě jmeme definovati.

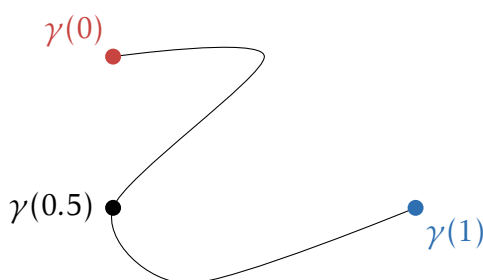
Korektní definice křivky patří spíše do oblasti matematické analýzy, ale není nijak složitá a, soudíme, i velmi intuitivní. Je přímým překladem aktu *nakreslení* libovolné souvislé neprotínající se čáry na papír do jazyka ma-

tematiky. Tento akt vyžaduje nějaký čas, řekněme pro jednoduchost 1 vteřinu, konkrétní hodnota je irelevantní. V čase 0, tedy než začneme kreslit, je tužka položená na papíře – nachází se v jednom konkrétním bodě roviny. Podobně, v čase 1, když skončíme s kreslením, je tužka opět položená na papíře v nějakém jiném bodě. Tak je tomu ovšem úplně v libovolném momentu kreslení, po uplynutí libovolně dlouhé doby kratší než jedna vteřina. Totiž, tužka je při kreslení v každém momentu času na jednom konkrétním místě na papíře, neboli v jednom bodě roviny.

O něco více formálně řečeno, křivka je zobrazení z intervalu  $[0, 1]$ , představujícího čas, do roviny  $\mathbb{R}^2$ , představující papír, takové, že vzniklý tvar je souvislý a neprotíná se. Naprosto korektní definice následuje.

**Definice 4.6.1 (Křivka v rovině).** Křivkou v rovině nazveme libovolné zobrazení  $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ , které je **spojité** (čára je souvislá) a **prosté** (čára se neprotíná). Množinu všech křivek v rovině označíme písmenem  $\Gamma$ , tj.

$$\Gamma := \{\gamma \mid \gamma \text{ je křivka v rovině.}\}$$



Obrázek 52: Křivka  $\gamma$  v rovině.

**Výstraha.** V **definici křivky** **není** nikde psáno, že by zobrazení  $\gamma$  mělo být v jakémkoli smyslu lineární, tedy, že  $\gamma(0.5)$  je bod přesně uprostřed nakreslené čáry. Klidně může být definované třeba tak, že v prvních 9 desetinách vteřiny tužkou skoro nepohneme a ve zbylém čase čáru dokreslíme.

Definovat linearitu v tomto smyslu navíc není vůbec triviální úloha vyžadující mimo jiné schopnost počítat délky křivek v rovině (integrální počet) a pojem reparametrizace. Operaci normalizace křivek, která je činí jakoby „lineární“ se v diferenciální geometrii nazývá *pa-*

*rametrizace obloukem.*

Už se blížíme finální definici *nakreslení grafu*, je třeba si jen rozmyslet pár maličností. Primárně, samotným nakreslením bude dvojice zobrazení  $D = (p, c)$  (z angl. **D**rawing, **p**oints a **c**urves), kde  $p$  vede z  $V$  do  $\mathbb{R}^2$  a  $c$  z  $E$  do  $\Gamma$ , tedy  $p$  přiřazuje vrcholům body roviny a  $c$  přiřazuje hranám křivky v rovině.

Požadujeme navíc, aby

- různým vrcholům odpovídaly různé body v rovině (to je hádám celkem logiš);
- křivka  $\gamma(uv)$  pro  $uv \in E$  začíná v  $u$  a končí ve  $v$ ;
- křivky odpovídající hranám pouze začínají nebo končí ve vrcholech, neprocházejí jimi (v opačném případě by bylo nemožné rozlišit třeba hranu  $uw$  od dvojice hran  $uv$  a  $vw$ , pokud by  $uw$  procházela vrcholem  $v$ ).

Formalizaci těchto podmínek přináší následující definice.

**Definice 4.6.2 (Nakreslení grafu).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Jeho *nakreslením* myslíme dvojici zobrazení  $D = (p, c)$ , kde  $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$  a  $c : E \rightarrow \Gamma$  takových, že

- $p$  je prosté (různým vrcholům odpovídají různé body);
- pro každou  $e \in E$  platí  $\gamma(e)(0) = p(s(e))$  a  $\gamma(e)(1) = p(t(e))$  (křivky odpovídající hranám začínají a končí v obrazech příslušných vrcholů);
- pro každou  $e \in E$  platí  $\#(\text{im } \gamma(e) \cap \text{im } p) = 2$  (to spolu s předchozí podmínkou znamená, že každá křivka prochází pouze svým počátečním a koncovým vrcholem).

Jelikož značení  $\gamma(e)$  a  $p(v)$  jsou poněkud komplikovaná, budeme obraz hrany  $e$  při zobrazení  $\gamma$  značit zkrátka  $\gamma_e \in \Gamma$ . Podobně, obrazem vrcholu  $v \in V$  při zobrazení  $p$  bude bod  $p_v \in \mathbb{R}^2$ .

### 4.6.1 Jordanova věta o kružnici

Zásadním nástrojem pro studium rovinných grafů – grafů, jež lze kreslit bez křížení hran – je tzv. *Jordanova věta o kružnici*, dlejší opět spíše v bydle matematické analýzy. Je zdárným příkladem faktu, že matematický jazyk není vždy v souladu s lidskou intuicí. Jedná se totiž, čtenáři jistě budou souhlasit, o intuitivně zřejmé tvrzení, které není však zdaleka snadné (avšak ani příliš náročné) dokázat.

Jordanova věta o kružnici říká zjednodušeně to, že nakreslíme-li v rovině kružnici a poté ji vyjmeme, rozdělíme rovinu na dvě oblasti – jednu omezenou (vnitřek kružnice) a jednu neomezenou (vnějšek kružnice). Jistá potřeba skrývá sebe ve faktu, že zde *kružnici* nemyslíme onu krásnou buclatou pravidelně kulatou ... no ... kružnici, ale libovolnou souvislou čáru, která se neprotíná a je uzavřená, tj. začíná tam, kde končí. Takové kružnici se říká třeba *topologická*, ale spíš jí nikdo žádné zvláštní jméno obvykle nepřidává. Je to vlastně křivka v rovině s tím rozdílem, že není zcela prostá, neboť se její koncové body shodují. Učinivše za dosti intuici, pokračujeme již formální definicí.

**Definice 4.6.3 (Topologická kružnice).** *Topologickou kružnici nazveme libovolné spojitě zobrazení  $\kappa : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$  takové, že*

- $\kappa(0) = \kappa(1)$  a
- $\kappa$  je prosté na  $(0, 1)$ .

Než trpělivě čtenáře seznámíme s formálním zněním Jordanovy věty o kružnici, musíme zmínit, co znamená, že nějaká podmnožina  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^2$  je *oblast*. Toto substantivum v sobě obvykle nese dvě vlastnosti:

- otevřenost (každý bod  $\Omega$  má kolem sebe okolí, tj. nekonečně mnoho bodů nekonečně blízko sebe; též se dá říct, že  $\Omega$  „nemá hranici“),
- souvislost (z každého bodu se dá po křivce dostat do každého).

Není těžké si všimnout (aspoň v případě kulaté kružnice), že hranicí jejího vnějšku i vnitřku je právě ona. Když ji vyjmeme, obě množiny přijdou o svou hranici a stanou se oblastmi.

Konečně, *omezenost* podmnožiny  $\mathbb{R}^2$  znamená, že existuje horní limit na



vzdálenost (v přirozeném slova smyslu) mezi dvěma jejími body.

**Věta 4.6.4 (Jordanova o kružnici).** Ať  $\kappa$  je topologická kružnice. Pak se  $\mathbb{R}^2 \setminus \text{im } \kappa$  rozpadá na dvě disjunktní oblasti – jednu omezenou a jednu neomezenou.

Jak jsme již zmiňovali, důkaz *Jordanovy věty* je kvítí ve vínku matematické analýzy a my jej zde uvádět nebudeme. Pouze ji v dalším textu občas použijeme.

#### 4.6.2 Rovinné grafy

Přívlastek „rovinný“ jsme v kontextu kreslení grafů zmínili již několikrát a neformálně jsme uvedli, že grafu řekneme rovinný, když se dá nakreslit bez křížení hran. Formulace „dá nakreslit“ je zde zásadního významu. Libovolný graf, který má aspoň dvě hrany, lze vždy nakreslit tak, aby se tyto křížily. Nás však zajímá pouze, zda existuje **nějaké** nakreslení takového grafu, ve kterém se žádné hrany nekříží.

Obecně, minimální nutný počet křížení hran v nakreslení grafu je bohatě nejvíce studovaná vlastnost z celé oblasti kreslení grafů. Definice křížení (nebo absence téhož) v nakreslení grafu není výrazně odlišná od té intuitivní. Zkrátka, řekneme, že dvě hrany se nekříží, když v průniku jejich obrazů leží pouze nakreslené vrcholy (tam se samozřejmě hrany křížit mohou a některé musejí).

**Definice 4.6.5 (Rovinný graf).** Graf  $G = (V, E)$  nazveme *rovinným*, když existuje jeho nakreslení  $D = (p, c)$  takové, že pro každé dvě různé hrany  $e, e' \in E$  platí

$$\text{im } \gamma_e \cap \text{im } \gamma_{e'} \subseteq \text{im } p.$$

Každé nakreslení rovinného grafu, které splňuje tuto podmínku, nazveme též *rovinným*.

Ve zbytku kapitoly nás čekají jeden snadný a dva těžké úkoly.

- (1) Definovat několik základních operací na vrcholech a hranách grafu, které přijdou vhod v dalším textu.

- (2) Zformulovat a dokázat několik základních vlastností rovinných grafů.
- (3) Dokázat Kuratowskiho větu, která dokonale klasifikuje rovinné grafy, tj. poskytuje konkrétní přímočaré kritérium, podle něž lze poznat, zda je graf rovinný, či nikoliv.

Začneme bodem (1). Budeme potřebovat zavést operace přidání a odebrání vrcholů a hran a konečně operaci dělení hrany. Význam prvních čtyř je snad jasný z názvu, pátá operace způsobuje vlastně přidání vrcholu do prostřed nějaké hrany. Dá se pomocí prvních čtyř vyjádřit jako

- odebrání dlouhé hrany,
- přidání vrcholu,
- přidání dvou hran vedoucích z tohoto vrcholu do počátečního a koncového vrcholu původní odebrané hrany.

I když intuitivně se operace pojímají snadno, formální definice není na-prosto přímočará. Spěšně si ji sepíšeme.

**Definice 4.6.6 (Základní grafové operace).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Definujeme následující operace na množinách  $V$  a  $E$ :

- operace přidání vrcholu, zapisujeme

$$G + v := (V \cup \{v\}, E).$$

- operace odebrání vrcholu (zde je třeba **odebrat i všechny hrany, které do tohoto vrcholu vedou**), pro  $v \in V$  zapisujeme

$$G - v := (V \setminus \{v\}, E \setminus \{e \in E \mid v \in e\}).$$

- operace přidání hrany, pro  $u, v \in V$  takové, že  $uv \notin E$ , zapisujeme

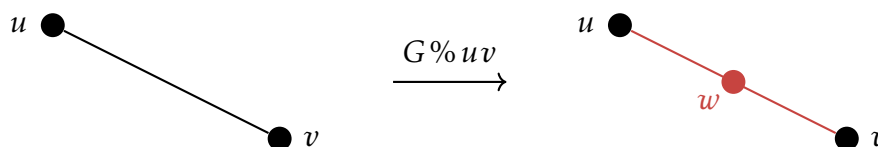
$$G + uv := (V, E \cup \{uv\}).$$

- operace odebrání hrany, pro  $uv \in E$  zapisujeme

$$G - uv := (V, E \setminus \{uv\}).$$

- operace dělení hrany, pro  $uv \in E$  zapisujeme

$$\begin{aligned} G \% uv &:= (V \cup \{w\}, (E \setminus \{uv\}) \cup \{uw\} \cup \{wv\}) \\ &= (((G - uv) + w) + uw) + wv. \end{aligned}$$



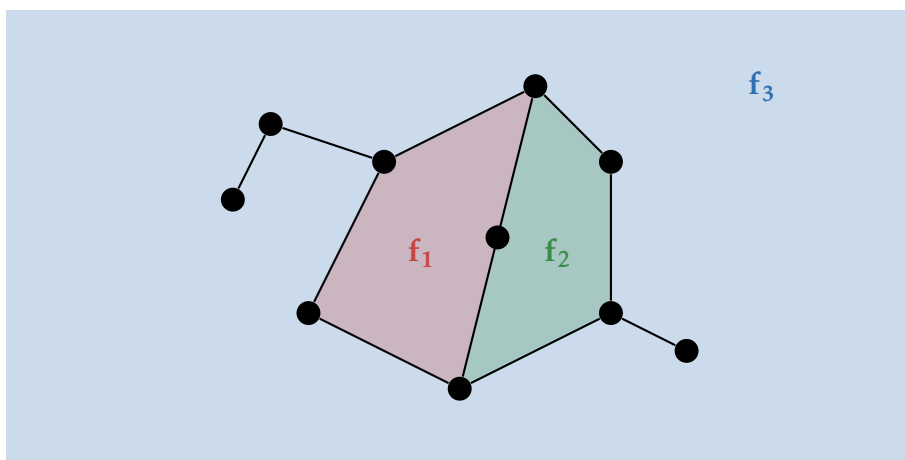
Obrázek 53: Operace dělení hrany  $uv$ .

Pokračujeme bodem (2). Asi není příliš překvapivé, že rovinné grafy nemohou mít příliš mnoho hran (vzhledem k počtu vrcholů). Čím víc hran do grafu přidám, tím se snižuje šance, že každou další hranu zvládnou nakreslit bez křížení s ostatními.

Nejprve objasníme, k čemu nám vlastně slouží [Jordanova věta o kružnicích](#). Totiž, kromě křivek a bodů reprezentujících hrany a vrcholy, získává nakreslení **rovinných** grafů ještě jednu strukturu – stěny. Lidsky řečeno, stěny daného nakreslení jsou oblasti roviny ohraničené hranami, přesněji cestami. Nahlédneme, že v důsledku [Jordanovy věty](#) se po vynětí všech hran nakreslení daného grafu  $G = (V, E)$  rozpadne rovina na několik omezených oblastí (tzv. „vnitřní stěny“) a jednu neomezenou (tzv. „vnější stěna“). Každou z těchto oblastí nazveme *stěnou* grafu  $G$  a množinu všech stěn označíme písmenem  $F$  (z angl. face).

**Poznámka.** Všimněte si, že pojem *stěny* definujeme pouze pro **rovinné** grafy. To má vlastně dva důvody. Zaprvé, stěny, které mají na svých hranicích průsečíky nakreslených hran neodpovídající žádným vrcholům, vytvářejí strukturu nezávislou na grafu  $G = (V, E)$ , jež kreslíme. To je algebraicky zcela nepřírozané.

Druhý důvod je více praktický. Totiž, jak jsme již zmínili, hrany můžeme kreslit tak, aby vznikl libovolný počet křížení. To zároveň znamená, že můžeme vytvořit libovolný počet stěn v daném nakreslení. Zásadní výsledek pro rovinné grafy (který si dokážeme) říká, že počet stěn v každém jeho rovinném nakreslení závisí pouze na počtu vrcholů a hran, a **nikoli na volbě samotného rovinného nakreslení**. To je překvapivě velmi hluboký výsledek, neboť ukazuje, že – v principu



Obrázek 54: Nakreslení grafu s vnitřními stěnami  $f_1$  a  $f_2$  a vnější stěnou  $f_3$ .

geometrická – struktura stěn je v případě rovinných grafů naprosto kompatibilní s jeho – v principu algebraickou – strukturou hran.

Abychom směli tvrdit, že graf vůbec *má* nějaké stěny, potřebujeme si rozmyslet, že nakreslený cyklus je topologická kružnice. To je intuitivně zřejmé, zkrátka na sebe postupně napojíme nakreslené hrany a ta poslední bude končit tam, kde ta první začala. Rozmyslet si tento fakt formálně je mírně složitější úloha.

Potřebujeme definovat spojení dvou křivek  $\gamma_1, \gamma_2$  takových, že  $\gamma_1(1) = \gamma_2(0)$  a dokázat, že za předpokladu, že se neprotínají nikde jinde, se jedná rovněž o křivku v rovině. Princip definice je velmi přímočarý – nová křivka  $\gamma$  bude zkrátka v čase od 0 do 1/2 sledovat křivku  $\gamma_1$  a od 1/2 do 1 sledovat křivku  $\gamma_2$ . Formálně lze toto nové zobrazení  $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$  definovat například následovně.

**Definice 4.6.7 (Spojení křivek).** Ať  $\gamma_1, \gamma_2$  jsou dvě křivky v rovině, které se neprotínají, a platí  $\gamma_1(1) = \gamma_2(0)$ . Potom definujeme jejich *spojení*, zapisované často zkrátka  $\gamma_1\gamma_2$ , předpisem

$$\gamma_1\gamma_2(t) := \begin{cases} \gamma_1(2t), & \text{pokud } t \in [0, \frac{1}{2}] \\ \gamma_2(2t - 1), & \text{pokud } t \in [\frac{1}{2}, 1]. \end{cases}$$

**Lemma 4.6.8.** Ať  $\gamma_1, \gamma_2$  jsou křivky v rovině, které se neprotínají, a  $\gamma_1(1) = \gamma_2(0)$ . Potom je spojení  $\gamma_1\gamma_2$  dobře definované a je to křivka v rovině.

**Důkaz.** „Dobrá definovanost“  $\gamma_1\gamma_2$  zkrátka znamená, že jsme nena-psali žádný nesmysl, tj. že to je opravdu *zobrazení* (to je zde zřejmé) a že jsme při jeho definici například neuvažovali body mimo domény zobrazení  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$ . To je velmi snadné ověřit, neboť pro  $t \in [0, 1/2]$  je  $2t \in [0, 1]$  a pro  $t \in [1/2, 1]$  je  $2t - 1 \in [0, 1]$ . V čase spojení  $t = 1/2$  máme

$$\gamma_1(2t) = \gamma_1(1) = \gamma_2(0) = \gamma_2(2t - 1),$$

tedy vše funguje, jak má.

Fakt, že  $\gamma_1\gamma_2$  je křivka v rovině, je též snadno vidět. Totiž, zcela jistě je to zobrazení  $[0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ . Dále, je spojitý, ježto  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  jsou spojitá a plynule na sebe navazují. Je též prostý, neboť  $\gamma_1$  i  $\gamma_2$  jsou prostá a z předpokladu se neprotínají.  $\square$

Z **předchozího lemmatu** triviální indukcí vyplývá, že jsou-li  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  křivky v rovině takové, že  $\gamma_i(1) = \gamma_{i+1}(0) \forall i$  a žádné dvě křivky se vzájemně neprotínají, pak  $\gamma_1\gamma_2 \dots \gamma_n$  je též křivka v rovině. Tento fakt již přirozeně vede k využití **Jordanovy věty** pro rovinná nakreslení. Máme-li totiž posloupnost  $\gamma_1, \dots, \gamma_n$  jako výše se stejnými podmínkami až na jedinou výjimku, že  $\gamma_n(1) = \gamma_1(0)$ , pak je tato topologickou kružnicí. Všimněme si též, že uvažovaná posloupnost je vždy nakreslením nějakého cyklu.

Nyní již konečně můžeme přikročit k formální definici *stěny* rovinného nakreslení grafu.

**Definice 4.6.9 (Stěna rovinného nakreslení).** Ať  $G = (V, E)$  je rovinný graf a  $D = (p, c)$  nějaké jeho rovinné nakreslení. Označme písmenem  $\mathcal{C}$  množinu všech cyklů grafu  $G$ . Každému cyklu  $e_1 \dots e_n \in \mathcal{C}$  odpovídá topologická kružnice  $\gamma_1 \dots \gamma_n$ , neboť uvažované nakreslení je rovinné, a tedy se  $\gamma_i$  navzájem neprotínají.

Ať  $\kappa_C$  značí topologickou kružnici vzniklou nakreslením cyklu  $C \in \mathcal{C}$ . Dle **Jordanovy věty** rozděluje  $\kappa_C$  rovinu na dvě oblasti. Každou oblast

množiny

$$\mathbb{R}^2 \setminus \bigcup_{C \in \mathcal{C}} \text{im } \kappa_C$$

nazýváme *stěnou* nakreslení  $D$ . Množinu všech stěn daného nakreslení  $D$  značíme  $F_D$ .

Vlastnosti rovinných nakreslení grafů je obecně obtížné kvantifikovat. Existuje vlastně jen jeden obecný vzorec, pomocí kterého se pak dokazuje řada dalších tvrzení. Ujal se pro něj název „Eulerův vztah“.

**Tvrzení 4.6.10 (Eulerův vztah).** Ať  $G = (V, E)$  je rovinný graf s  $k \in \mathbb{N}$  komponentami souvislosti a  $D$  nějaké jeho rovinné nakreslení. Pak platí

$$\#V - \#E + \#F_D = k + 1.$$

**Důkaz.** Nejprve budeme předpokládat, že  $G$  je souvislý, tj.  $k = 1$  a dokážeme, že

$$\#V - \#E + \#F_D = 2.$$

Je-li  $G$  navíc strom, pak  $\#V = \#E + 1$  a  $\#F_D = 1$ , ježto  $G$  neobsahuje cyklus. Odtud dostaneme

$$\#V - \#E + \#F_D = \#E + 1 - \#E + 1 = 2.$$

Ať  $G$  nyní naopak obsahuje cyklus. Postupujme indukcí podle počtu hran,  $\#E$ . Prvním smysluplným případem je  $\#E = 3$ , neboť cyklus musí mít aspoň tři hrany. Pak  $G = K_3$ , tj. trojúhelník (úplný graf na třech vrcholech), a vzorec platí. Dále ať  $e \in E$  je hrana obsažená v nějakém cyklu. Z indukčního předpokladu vzorec platí pro graf  $G - e$ . Nakreslení hrany  $e$  vytvoří cyklus, a tudíž z [Jordanovy věty](#) rozdělí existující stěnu na dvě nové. Protože počet hran stoupne o 1, počet stěn rovněž a počet vrcholů zůstane nezměněn, platí vzorec i pro  $G$ .

Ať nyní  $G$  není nutně souvislý graf s  $k$  komponentami souvislosti značenými  $G_i = (V_i, E_i)$ ,  $i \leq k$ . Zřejmě platí

$$\#V = \sum_{i=1}^k \#V_i \quad \text{a} \quad \#E = \sum_{i=1}^k \#E_i,$$

neboť komponenty grafu z definice nesdílejí hrany ani vrcholy.

Označme  $D_i$  nakreslení  $i$ -té komponenty. Každá komponenta přispívá do celkového počtu stěn  $G$  všemi svými vnitřními (tedy omezenými) stěnami, avšak všechny komponenty sdílejí vnější neomezenou stěnu. Sečteme-li tedy velikosti  $\#F_{D_i}$  přes všechna  $i$ , pak onu vnější stěnu započteme  $k$ -krát. Pročež, abychom dostali skutečnou velikost  $\#F_D$ , musíme tuto  $(k-1)$ -krát odečíst. Z tohoto pozorování již snadno plyne, že

$$\sum_{i=1}^k \#F_{D_i} = \#F_D + k - 1. \quad (*)$$

Konečně, pro každou komponentu platí z předchozího vzorec

$$\#V_i - \#E_i + \#F_{D_i} = 2.$$

Sečtením přes všechny komponenty souvislosti dostaneme

$$\sum_{i=1}^k \#V_i - \sum_{i=1}^k \#E_i + \sum_{i=1}^k \#F_{D_i} = \sum_{i=1}^k 2 = 2k.$$

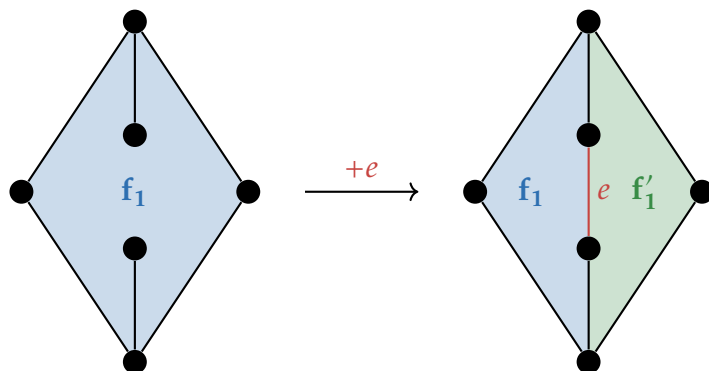
Dosazením  $(*)$  dostaneme

$$\#V - \#E + \#F_D + k - 1 = 2k,$$

z čehož pouhou úpravou

$$\#V - \#E + \#F_D = k + 1,$$

což zakončuje důkaz. □



Obrázek 55: Indukční krok v důkazu tvrzení 4.6.10.

**Poznámka.** Důsledkem [Eulerova vztahu](#) je, že počet stěn rovinného grafu je **nezávislý na volbě nakreslení**. Přestože stěny samotné nemusejí být napříč nakresleními totožné, odpustíme sobě lehký prohrěšek vůči rigorositě a budeme množinu stěn rovinného grafu  $G$  značit obecně písmenem  $F$ , nedbajíc volby rovinného nakreslení. Máme-li totiž dvě rovinná nakreslení  $D, D'$ , pak mezi  $F_D$  a  $F_{D'}$  existuje bijekce. Prosté značení  $F$  je tedy korektní „až na bijekci“.

Připomeňme problém tří domů a tří studní ze [sekce 1.1](#). Na jejím závěru tvrdíme, že nemá řešení, tedy, že neexistuje způsob, jak každý z tří domů spojit cestou s každou ze tří studní tak, aby se cesty nekřížily. Nyní již tento problém umíme matematicky zformulovat – tvrdíme, že graf  $K_{3,3}$  není rovinný.

Než toto tvrzení dokážeme, připomeneme rovněž, že zápisem  $K_n$  myslíme úplný graf na  $n \in \mathbb{N}$  vrcholech, tj. graf, v němž je každý pár vrcholů spojen hranou. Dále, zápis  $K_{m,n}$  značí tzv. *úplný bipartitní graf* na  $m+n$  vrcholech. To je graf, jehož množinu vrcholů  $V$  lze rozdělit na dvě disjunktní podmnožiny  $V_1$  a  $V_2$  velikostí  $m$  a  $n$ , respektive, takové, že mezi každým párem vrcholů  $v_1, v_2$ , kde  $v_1 \in V_1$  a  $v_2 \in V_2$ , vede hrana, ale mezi dvěma vrcholy ze stejné množiny hrana nevede.

Snad nejdůležitější tvrzení teorie kreslení grafů, [Kuratowskiho věta](#), tvrdí, že  $K_5$  a  $K_{3,3}$  jsou **jediné dva nerovinné grafy** v tom smyslu, že každý nerovinný graf musí jeden z nich obsahovat.

Tuto sekci zakončíme tím, že z [Eulerova vztahu](#) odvodíme omezení na počet hran (v závislosti na počtu vrcholů) rovinných grafů, které  $K_{3,3}$  ani  $K_5$  nesplňují, což bude znamenat, že nejsou rovinné. Důkaz opačné implikace, že každý nerovinný graf jeden z těchto grafů obsahuje je mnohem těžší a je mu věnována [následující sekce](#).

**Lemma 4.6.11.** Ať  $G = (V, E)$  je rovinný graf. Pak platí

- (a)  $\#E \leq 3\#V - 6$ ;
- (b) neobsahuje-li navíc  $G$  trojúhelník (tj.  $K_3$ ) jako podgraf, pak  $\#E \leq 2\#V - 4$ .



**Důkaz.** Začneme důkazem části (a), část (b) se z něj pak snadnou modifikací odvodí.

Nejprve uvažíme případ, kdy  $G$  neobsahuje cyklus. Pak máme  $\#F = 1$  a  $\#E = \#V - k$  (buď z [Eulerova vztahu](#) nebo prostou úvahou). Nerovnost

$$\#E = \#V - k \leq 3\#V - 6,$$

platí právě tehdy, když  $\#V \geq (6 - k)/2$ . Jelikož  $\#V$  i  $k$  jsou přirozená čísla, tento vztah automaticky platí, kdykoli  $\#V \geq 3$ . To nám stačí, neboť všechny grafy na dvou a méně vrcholech jsou zřejmě rovinné.

Nyní ať  $G$  obsahuje cyklus. To zároveň znamená, že má aspoň dvě stěny. Vezměme libovolnou z nich a označme ji  $f \in F$ . Dále označme  $E_f \subseteq E$  množinu těch hran, které leží na hranici  $f$  (tj. těch, které ji oddělují od ostatních stěn). Uvažme podgraf  $G_f = (V, E_f)$ . Ten je samozřejmě stále rovinný, neboť vznikl z  $G$  odebráním nějakého počtu hran. Všimněme si dále, že  $f$  je stále stěnou v  $G_f$ , bo hrany tvořící její hranici zůstaly nedotčeny, a tedy se nemohla  $f$  zvětšit ani zmenšit. Protože nakreslení  $G$  mělo aspoň dvě stěny, má nakreslení  $G_f$  rovněž aspoň dvě stěny, a tudíž obsahuje cyklus. Tento cyklus je podmnožinou  $E_f$ , z čehož plyne, že  $\#E_f \geq 3$ , neboť cyklus má aspoň 3 hrany.

Když nerovnost z předchozího odstavce sečteme přes všechny stěny  $f \in F$ , dostaneme

$$\sum_{f \in F} \#E_f \geq \sum_{f \in F} 3 = 3\#F.$$

Zároveň, každá hrana je buď uvnitř stěny, nebo na její hranici, tj. náleží buď jedné nebo dvěma stěnám. Odtud máme další nerovnost,

$$\sum_{f \in F} \#E_f \leq 2\#E.$$

Sloučením obou nerovností obdržíme  $3\#F \leq 2\#E$ , neboli  $\#F \leq 2\#E/3$ . Dosazením do [Eulerova vztahu](#) dostaneme

$$\#E = \#V + \#F - k - 1 \leq \#V + \frac{2\#E}{3} - k - 1.$$

Prostou úpravou pak

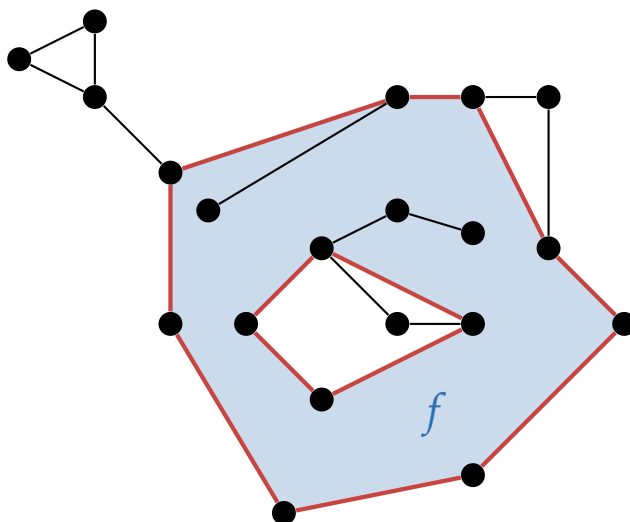
$$\#E \leq 3\#V - 3k - 3.$$

Protože  $G$  má aspoň jednu komponentu ( $k \geq 1$ ), plyne odtud

$$\#E \leq 3\#V - 6,$$

což dokazuje část (a).

Část (b) lze dokázat zcela obdobným způsobem. Stačí si pouze uvědomit, že neobsahuje-li  $G$  trojúhelníky, pak každý cyklus má aspoň 4 hrany, a tudíž máme pro každou  $f \in F$  nerovnost  $\#E_f \geq 4$ . Identická posloupnost úprav pak dá kýžený závěr.  $\square$



Obrázek 56: Množina  $E_f$  v důkazu lemmatu 4.6.11.

**Cvičení 4.6.1.** Najděte rovinný graf, jehož všechny vrcholy mají stupeň 5 (vizte definici 4.6.15).

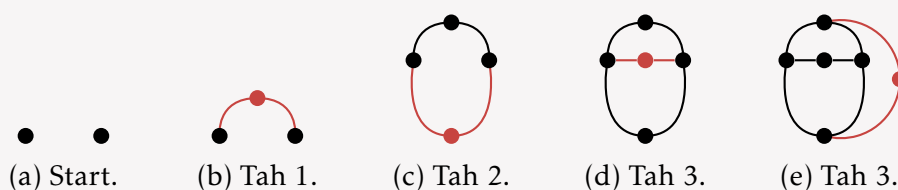
**Cvičení 4.6.2.** Ukažte, že odhad  $\#E \leq 2\#V - 4$  pro rovinný graf  $G = (V, E)$  bez trojúhelníků je nejlepší možný. To jest, pro libovolné  $n \in \mathbb{N}$  zkonstruujte rovinný graf s  $n$  vrcholy a  $2n - 4$  hranami.

**Cvičení 4.6.3.** Hra „sprouts“ vynalezená J. H. Conwayem a M. S. Patersonem má následující pravidla:

- Na papíře je nakresleno  $n \in \mathbb{N}$  puntíků.

- Hráči se střídají po tazích, a kdo nemůže táhnout, prohrává.
- V každém tahu spojí hráč dva existující puntíky obloukem a někde na tento oblouk nakreslí nový puntík.
- Puntík je možné použít jako jeden z konců nového oblouku jedině tehdy, když v něm končí nanejvýš dva již nakreslené oblouky.

Na [obrázku 57](#) vizte příklad 4 prvních tahů pro  $n = 2$ .



Obrázek 57: Příklad prvních čtyř tahů hry *sprouts* pro  $n = 2$ .

Dokažte, že

- pro  $n$  počátečních puntíků má tato hra maximálně  $3n - 1$  tahů;
- (těžké) pro  $n$  počátečních puntíků má tato hra **nejméně**  $2n$  tahů (bez ohledu na strategii hráčů).

### 4.6.3 Kuratowského věta

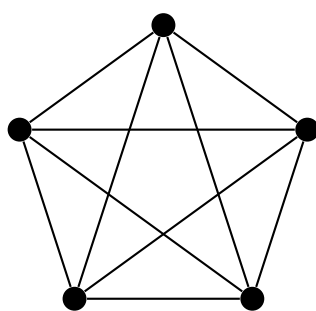
Závěrem kapitoly o kreslení grafů a vlastně i závěrem celé části o teorii grafů uvedeme zatím nejsilnější výsledek v celém textu, který dokonale charakterizuje rovinné grafy. Jeho důkaz je těžký a dlouhý žádá mnohých příprav.

V [předchozí sekci](#) jsme tvrdili, že každý nerovinný graf musí obsahovat  $K_{3,3}$  nebo  $K_5$ . To není zcela korektní. Ve skutečnosti musí obsahovat *dělení* jednoho z těchto speciálních nerovinných grafů jako podgraf. Ihned vysvětlíme, co tento pojem znamená.

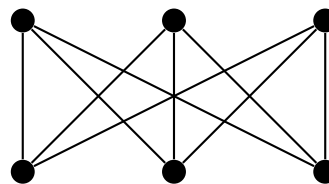
**Definice 4.6.12 (Dělení grafu).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. *Dělením* grafu  $G$  myslíme libovolný graf  $H$ , který vznikl z  $G$  nějakým počtem opakování operace dělení hrany.

Nyní můžeme vyslovit slavnou Kuratowskiho větu.

**Věta 4.6.13 (Kuratowskiho).** Graf  $G$  je rovinný právě tehdy, když  $G$  **neobsahuje** jako podgraf dělení  $K_5$  ani dělení  $K_{3,3}$ .



(a) Úplný graf  $K_5$ .



(b) Úplný bipartitní graf  $K_{3,3}$ .

Obrázek 58: Minimální nerovinné grafy.

Je důležité podotknout, že **Kuratowskiho věta** je formulována jako **ekvivalence**. Tvrdí tudíž dvě věci:

- Žádné dělení grafů  $K_5$  a  $K_{3,3}$  není rovinné.
- Každý nerovinný graf obsahuje jako podgraf aspoň jedno takové dělení.

Dokázat první bod není s přístupem k výsledkům **předchozí sekce** obtížné. Ukážeme nejprve, že  $K_{3,3}$  ani  $K_5$  nejsou rovinné.

**Lemma 4.6.14.** Grafy  $K_5$  a  $K_{3,3}$  nejsou rovinné.

**Důkaz.** K důkazu obou tvrzení využijeme odhadu na počet hran rovinných grafů z **lemmatu 4.6.11**.

V případě  $K_5$  stačí odhad  $\#E \leq 3\#V - 6$ . Totiž,  $K_5$  má 5 vrcholů a  $\binom{5}{2} = 10$  hran. Ihned si všimneme, že  $3 \cdot 5 - 6 = 9 < 10$ , což znamená, že aspoň

jeden pár hran se musí při nakreslení  $K_5$  zkřížit, a tedy tento graf není rovinný.

Graf  $K_{3,3}$  má  $3 + 3 = 6$  vrcholů a  $3 \cdot 3 = 9$  hran. Tudíž splňuje slabší z odhadů v [lemmatu 4.6.11](#). Ovšem, všimněme si, že  $K_{3,3}$  neobsahuje trojúhelníky. Vskutku, existence trojúhelníku  $v_1 v_2 v_3 v_1$  by znamenala existenci hrany  $v_3 v_1$  mezi dvěma vrcholy ze stejné části, což nelze. Můžeme tedy použít silnější odhad  $\#E \leq 2\#V - 4$ , který již  $K_{3,3}$  nesplňuje, poněvadž  $2 \cdot 6 - 4 = 8 < 9$ , tudíž je opět nutno při jeho kreslení zkřížit aspoň jeden pár hran.  $\square$

[Předchozí lemma](#) doplníme o pár zřejmých pozorování.

**Pozorování.** Graf  $G$  je rovinný právě tehdy, když každé jeho dělení je rovinné.

**Důkaz.** Zřejmý. Operace dělení hrany se v nakreslení grafu projeví nahradou křivky  $\gamma$  křivkami  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$ , které lze vždy nakreslit tak, aby jejich spojením  $\gamma_1 \gamma_2$  byla původní křivka  $\gamma$ . Počet křížení hran při daném nakreslení tudíž zůstává nezměněn.  $\square$

**Pozorování.** Každý podgraf  $H$  rovinného grafu  $G$  je rovinný.

**Důkaz.** Zřejmý. Vezměme libovolné rovinné nakreslení  $G$  a vymažme všechny hrany a vrcholy, které nepatří do  $H$ . Získali jsme rovinné nakreslení  $H$ .  $\square$

Tato dvě pozorování společně s [lemmatem 4.6.14](#) dávají důkaz jedné implikace v [Kuratowskiho větě](#). Totiž, ať  $G$  je graf obsahující jako podgraf nějaké dělení  $K_5$  nebo  $K_{3,3}$ . Podle [lemmatu 4.6.14](#) a prvního pozorování je toto dělení nerovinný graf. Podle druhého pozorování  $G$  rovněž není rovinný.

Jak pravichom, důkaz opačné implikace je výrazně obtížnější. Velmi hrubě řečeno spočívá v nalezení maximálního cyklu v daném nerovinném grafu po odebrání jedné křížící se hrany a v následné diskusi možných způsobů, jak zabránit tomu, aby tato hrana mohla být dovnitř zvoleného cyklu (ne vně, neboť je maximální) nakreslena bez křížení. Zjistíme, že vzniklé vzorce vrcholů a hran tvořící tuto zábranu již nutně definují graf, který je

dělením  $K_5$  nebo  $K_{3,3}$ .

Začneme pár dalšími definicemi.

**Definice 4.6.15 (Stupeň vrcholu).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. *Stupeň vrcholu*  $v \in V$  je počet hran, jímž náleží. Formálně,

$$\deg_G v := \#\{e \in E \mid v \in e\}.$$

**Definice 4.6.16 (Řezný vrchol).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Vrchol  $v \in V$  nazveme *řezným*, pokud  $G - v$  má více komponent než  $G$ .

Lidově řečeno, řezné vrcholy jsou takové vrcholy  $G$ , podle kterých jej můžeme „nařezat“ na menší grafy.

**Definice 4.6.17 (Blok).** Ať  $G = (V, E)$  je graf. Podgraf  $B$  grafu  $G$  nazveme *blokem*, pokud je to **maximální** podgraf  $G$  bez řezných vrcholů. Slovo „maximální“ zde míní takový podgraf  $B$ , ke kterému když přidáme libovolný vrchol, který v něm neleží, bude už  $B$  obsahovat řezný vrchol.

**Definice 4.6.18 (2-souvislost).** Graf  $G = (V, E)$  nazveme *2-souvislým*, pokud je souvislý a neobsahuje řezný vrchol. Tj. takový graf, který zůstane souvislý i po odebrání libovolného vrcholu.

**Poznámka.** Značení „2-souvislý“ může působit poněkud neintuitivně. Vlastně se jedná o speciální případ vlastnosti grafů zvané  $k$ -souvislost. Ta se definuje tak, že graf je  $k$ -souvislý, kdykoli je souvislý a zůstane tak i po odebrání libovolných  $k - 1$  vrcholů.

Dokážeme si dvě pomocná lemmata o 2-souvislých grafech.

**Lemma 4.6.19.** Ať  $G = (V, E)$  je 2-souvislý graf a  $u, v \in V$ . Pak v  $G$  existuje cyklus obsahující  $u$  i  $v$ .

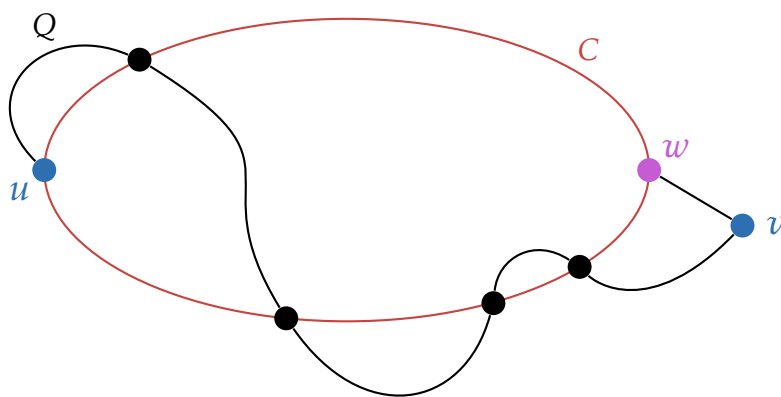
**Důkaz.** Budeme postupovat indukcí podle vzdálenosti mezi  $u$  a  $v$ .

Prvním indukčním krokem je případ  $d_G(u, v) = 1$ , tj.  $uv \in E$ . Uvažme graf  $G - u$ . Nejprve si všimněme, že  $u$  musí mít aspoň dva sousedy, tj. stupeň aspoň 2. Kdyby tomu tak nebylo, byl by  $v$  řezným vrcholem, neboť jeho vymazání by izolovalo vrchol  $u$  od zbytku grafu. To by bylo ve sporu s předpokladem 2-souvislosti  $G$ .

Ať je tedy  $w$  libovolný soused  $u$  různý od  $v$ . Protože  $G$  je 2-souvislý, je  $G - u$  souvislý. To znamená, že mezi  $v$  a  $w$  vede v  $G - u$  cesta, která samozřejmě neobsahuje  $u$ , neboť jsme jej vyňali. Přidáním hrany  $uv$  k této cestě vznikne cyklus v  $G$ , který obsahuje  $u$  i  $v$ .

Nyní předpokládejme, že  $d_G(u, v) = d$  a tvrzení platí pro všechny dvojice vrcholů se vzdáleností ostře menší než  $d$ . Ať  $P$  je cesta délky  $d$  mezi  $u$  a  $v$  a  $w$  je předposlední vrchol na této cestě (tedy soused  $v$ , který leží na  $P$ ). Jelikož  $d_G(u, w) = d - 1$ , existuje z indukčního předpokladu cyklus  $C$  obsahující  $u$  i  $w$ . Dále,  $G - w$  je souvislý, a tedy v něm existuje cesta  $Q$  mezi  $u$  a  $v$ , která samozřejmě neprochází vrcholem  $w$ . Střídavým sledováním vrcholů cyklu  $C$  a cesty  $Q$  tak, aby se žádné neopakovaly, dostaneme cyklus obsahující  $u$  a  $v$ .

Formální zápis poslední věty je extrémně zdlouhavý a nepřináší užitečné ideje. Pro lepší představu vizte [obrázek 59](#).  $\square$



Obrázek 59: Konec důkazu [lemmatu 4.6.19](#). Sledováním obrázku po obvodu dostaneme cyklus obsahující  $u$  a  $v$  složený z vrcholů cyklu  $C$  a cesty  $Q$ .

**Definice 4.6.20 (Ucho).** Ať  $G = (V, E)$  je graf a  $H = (V', E')$  jeho podgraf. *Uchem* v grafu  $G$  ke grafu  $H$  myslíme cestu  $e_1 e_2 \cdots e_n$ , kde  $e_i \in E$ , takovou, že  $s(e_1), t(e_n) \in V'$ , ale  $e_i \notin E'$  pro každé  $i \leq n$ . Je to tedy vlastně cesta, která začíná a končí v  $H$ , ale jinak jím neprochází.

**Lemma 4.6.21.** Každý 2-souvislý graf lze zkonstruovat z cyklu přidáváním uch.

**Důkaz.** Ať  $G = (V, E)$  je graf vzniklý touto konstrukcí. Dokážeme, že  $G$  je 2-souvislý. Budeme postupovat indukcí podle počtu přidaných uch. Nepřidali-li jsme ani jedno ucho, pak je  $G$  cyklus, který je jistě 2-souvislý. Nyní ať  $U$  je nově přidané ucho ke  $G$  a  $u_1, u_2 \in V$  jsou vrcholy, kterými je  $U$  ke  $G$  připojeno. Protože  $G$  byl z indukčního předpokladu 2-souvislý, musí případný řezný vrchol ležet na  $U$ . Předpokládejme pro spor tedy, že takový existuje, a označme ho  $v \in U$ . Rozlišíme dva případy:

- (1)  $v \notin V$ ; v takovém případě byl  $v$  součástí cyklu, který získáme tak, že spojíme cestu mezi  $u_1$  a  $u_2$  v  $G$  s nově přidaných uchem  $U$ . Protože má navíc  $v$  jen dva sousedy, nemůže jeho odebrání graf rozpojit.
- (2)  $v \in \{u_1, u_2\}$ ; v tomto případě není  $v$  řezným v  $U$  (protože je na jeho konci) a není z předpokladu 2-souvislosti řezný ani v  $G$ . Tudiž není řezný ani v grafu  $G$  sloučeném s uchem  $U$ .

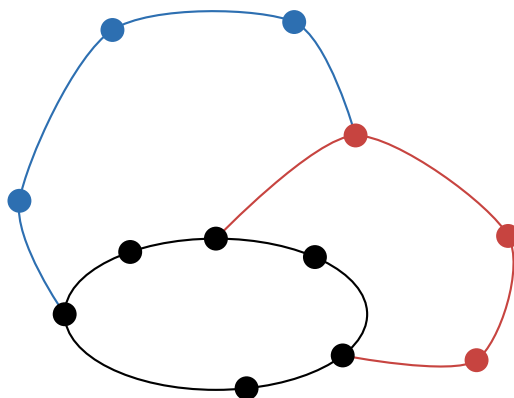
Pokračujeme důkazem, že **každý** 2-souvislý graf  $G = (V, E)$  lze takto postavit. Podle [lemmatu 4.6.19](#)  $G$  obsahuje cyklus. Vezměme maximální podgraf  $H = (V', E')$  grafu  $G$ , který lze přidáváním uch zkonstruovat. K důkazu stačí ověřit, že  $H$  už je celý graf  $G$ . Platí, že

- $H$  je indukovaný podgraf. Vskutku, pokud  $H$  indukovaný není, pak existuje hrana  $e \in E$ , která spojuje dva vrcholy z  $H$ , ale sama v  $H$  neleží. Z [definice](#) je taková hrana ucho k  $H$ , což je spor s maximalitou  $H$ .
- $H = G$ . Pro spor ať toto neplatí. Uvažme hranu  $uv \in E$  takovou, že  $u \in V'$  a  $v \in V \setminus V'$ , tedy takovou, že její začátek leží v  $H$  a konec mimo  $H$ . Taková hrana určitě existuje, neboť  $G$  je souvislý, a tudíž  $H$  nemůže být komponenta  $G$ . Navíc,  $G$  je též 2-souvislý,



pročež existuje cyklus (opět z [lemmatu 4.6.19](#)) obsahující  $u$  a  $v$ . Odebereme-li z tohoto cyklu všechny hrany, které neleží v  $E'$ , dostaneme ucho k grafu  $H$  a tím opět spor s maximalitou tohoto podgrafu.

Jelikož  $H$  vznikl z předpokladu přidáváním uch k cyklu a platí  $H = G$ , důkaz je hotov.  $\square$



Obrázek 60: Konstrukce z [lemmatu 4.6.21](#).

Konečně jsme splnili veškerou přípravu nutnou k důkazu Kuratowského věty. Těžkou implikaci dokážeme sporem. Budeme předpokládat, že existuje nerovinný graf  $G = (V, E)$ , který **neobsahuje** dělení  $K_5$  ani  $K_{3,3}$ . Navíc, ze všech takových grafů si vezmeme ten minimální co do počtu vrcholů a hran. Tím myslíme, že pro každý  $v \in V$  a pro každou  $e \in E$  jsou již grafy  $G - v$  a  $G - e$  rovinné. Ukážeme, že takový minimální graf  $G$  musí splňovat jisté striktní podmínky, které nakonec povedou k závěru, že ve skutečnosti obsahuje dělení  $K_5$  nebo  $K_{3,3}$ , což bude přímý spor s předpokladem.

Následující důkaz v průběhu doplníme pomocnými lemmaty a tvrzeními, neboť psát ho celý bez přerušení by bylo velmi nepřehledné a vyčerpávající.

**Důkaz (Kuratowského věty).** Implikaci zleva doprava jsme již diskutovali výše. Obsahuje-li graf  $G$  dělení  $K_5$  nebo  $K_{3,3}$  jako podgraf, pak není rovinný.

Dokazujeme tedy, že každý nerovinný graf musí obsahovat dělení  $K_5$  nebo  $K_{3,3}$ . Mějme zvolený minimální nerovinný graf  $G = (V, E)$ , který

neobsahuje dělení  $K_5$  ani  $K_{3,3}$  z úvahy nad důkazem.

**Pomocné tvrzení 1.** Graf  $H$  je rovinný právě tehdy, když každý jeho blok je rovinný.

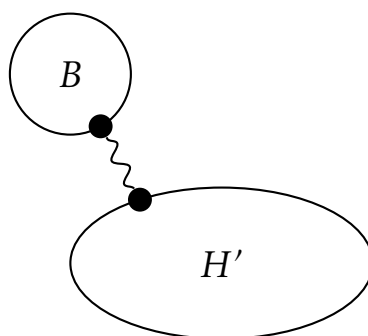
**Důkaz.** Je-li  $H$  rovinný, pak je každý jeho podgraf rovinný, tedy speciálně i každý jeho blok je rovinný.

Nechť naopak je každý blok  $H$  rovinný. Nejprve si uvědomíme, že dva různé bloky se pronikají v maximálně jednom vrcholu (který je tím pádem řezný v grafu  $H$ ). Kdyby totiž v jejich průniku byly dva nebo více, pak bychom mohli jeden z nich odebrat a bloky bychom tím neoddělili; to by znamenalo, že jejich sloučení byl 2-souvislý graf, což je spor s definicí bloku jako maximálního 2-souvislého podgrafu.

Dále postupujme indukcí podle počtu bloků grafu  $H$ . Když má  $H$  jeden blok, tak tvrzení zřejmě platí.

V druhém indukčním kroku uvažujeme, že  $H$  má  $n \in \mathbb{N}$  různých bloků. Mezi nimi musí existovat aspoň jeden blok  $B$ , který sousedí pouze s jedním dalším (tedy s ním sdílí vrchol nebo je s ním spojen cestou). Kdyby tomu taky nebylo, tak by každý blok byl součástí cyklu bloků (neboť by každý blok měl aspoň dva sousedy). Je snadné nahlédnout, že cyklus bloků je 2-souvislý graf a dostáváme opět spor s maximalitou bloků.

Uvažme graf  $H'$  vzniklý z  $H$  odebráním všech vrcholů z  $B$  kromě případného vrcholu v průniku  $B$  s jeho sousedem. Graf  $H'$  má o jeden blok méně než  $H$ , čili je z indukčního předpokladu rovinný. Nyní nakreslíme  $H'$  tak, aby onen vrchol spojující  $H'$  a  $B$  byl součástí vnější stěny (to zřejmě vždy lze). Blok  $B$  dokreslíme rovněž na vnější stěně, čímž získáme rovinné nakreslení  $H$ .  $\square$



Obrázek 61: Indukční krok v důkazu [pomocného tvrzení 1](#).

Připomeňme, že stále pracujeme s fixním minimální nerovinným grafem  $G$  neobsahujícím dělení ani  $K_5$  ani  $K_{3,3}$ .

**Pomocné tvrzení 2.**  $G$  je nutně 2-souvislý.

**Důkaz.** Předpokládejme, že  $G$  2-souvislý není. Pak podle [pomocného tvrzení 1](#) obsahuje nějaký nerovinný blok. Pokud by tento blok nebyl celý graf  $G$ , pak bychom našli menší nerovinný graf neobsahující dělení  $K_5$  ani  $K_{3,3}$ , což by byl spor s minimalitou  $G$ . Tedy,  $G$  sám je blok, a tudíž je 2-souvislý z definice.  $\square$

**Pomocné tvrzení 3.**  $G$  neobsahuje vrchol stupně menšího než 3.

**Důkaz.**  $G$  neobsahuje vrchol stupně 0, neboť je souvislý. Podobně,  $G$  neobsahuje ani žádný vrchol stupně 1, protože libovolný soused takového vrcholu by byl řezný, a tudíž by  $G$  nebyl 2-souvislý, což by znamenalo spor s [pomocným tvrzením 2](#).

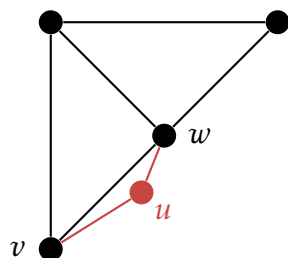
Zbývá ukázat, že  $G$  neobsahuje ani vrchol stupně 2. Uvažme tudíž pro spor nějaký vrchol  $u$  stupně 2 a označme  $v, w$  jeho dva sousedy. Rozlišíme dva případy.

- (1) Existuje hrana  $vw \in E$ , tj.  $v$  a  $w$  jsou sousedi. Z předpokladu minimality  $G$  je graf  $G - u$  rovinný. Zvolme tedy nějaké jeho rovinné nakreslení. K tomuto nakreslení lze přikreslit cestu  $vuw$  libovolně blízko hraně  $vw$  aniž dojde ke křížení. To ale znamená, že

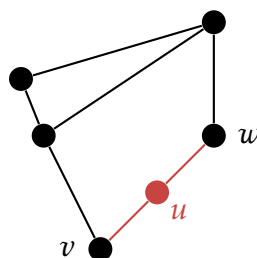
$G$  má rovinné nakreslení, což je spor.

- (2) Hrana  $vw$  neexistuje. Smažme vrchol  $u$  a přidejme hranu  $vw$ . Vzniklý graf má o jednu hranu a jeden vrchol méně než  $G$ , a tedy je z předpokladu rovinný. Ovšem, v libovolném rovinném nakreslení tohoto grafu, můžeme rozdělit hranu  $vw$  a tím získat zpět smazaný vrchol  $u$ . Již jsme zpozorovali, že dělení rovinného grafu je rovinné, tudíž získáváme opět spor s tím, že  $G$  není rovinný.

V obou případech jsme došli ke sporu, pročez každý vrchol  $G$  má stupeň alespoň 3.  $\square$



(a) Případ (1).



(b) Případ (2).

Obrázek 62: Důkaz [pomocného tvrzení 3](#).

**Pomocné tvrzení 4.**  $G$  má hranu  $e \in E$  takovou, že  $G - e$  je stále 2-souvislý.

**Důkaz.** Podle [lemmatu 4.6.21](#) vznikl  $G$  opakovaným přidáváním uch k cyklu. Ať  $U$  značí poslední přidané ucho. Má-li  $U$  délku aspoň dva, pak v něm existuje vrchol stupně 2, což je spor s [pomocným tvrzením 3](#). Odtud plyne, že  $U$  musí být pouze jediná hrana  $e \in E$ . Pak je  $G - e$  zřejmě stále 2-souvislý (neboť též vznikl přidáváním uch k cyklu).  $\square$

Pomalu ale jistě se blížíme ke konci důkazu. Ať  $H := G - uv$ , kde  $uv \in E$  je hrana  $G$  taková, že  $G - uv$  je stále 2-souvislý (jejíž existence je zaručena [pomocným tvrzením 4](#)). Protože  $G$  byl minimální nerovinný, je  $H$  z předpokladu rovinný graf. Dále,  $H$  je 2-souvislý, a tudíž v něm,

podle [lemmatu 4.6.19](#), existuje aspoň jeden cyklus obsahující  $u$  i  $v$ .

Nyní volme takové rovinné nakreslení  $D$  grafu  $H$ , že obsahuje cyklus  $C$  splňující:

- $C$  obsahuje  $u$  i  $v$ .
- Počet stěn uvnitř  $C$  je maximální přes všechna možná rovinná nakreslení.
- Je-li  $C'$  jiný cyklus obsahující  $u$  i  $v$ , pak počet stěn uvnitř  $C'$  v libovolném nakreslení  $H$  je menší nebo roven počtu stěn v  $C$ .

Shrňme v lidském jazyce, co poslední dva body říkají. Volíme cyklus  $C$  a nakreslení  $D$  takové, že počet stěn uvnitř  $C$  je maximální přes **všechny** cykly obsahující  $u$  a  $v$ , přes **všechna** možná rovinná nakreslení  $H$ . Ještě jinak řečeno, kdykoli nakreslíme  $H$  jakýmkoli rovinným způsobem a zvolíme v něm jakýkoli cyklus obsahující  $u$  a  $v$ , tak tento cyklus bude mít uvnitř nejvíce tolik stěn jako  $C$  při nakreslení  $D$ .

Označme

$$C = (u = v_0)v_1v_2 \cdots (v_k = v)v_{k+1} \cdots v_lv_0.$$

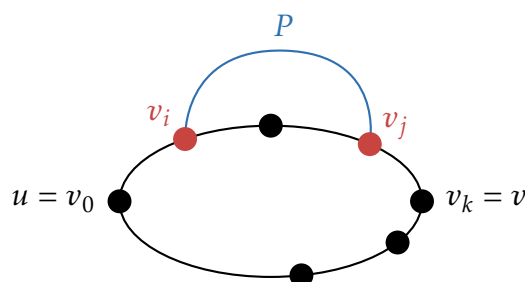
Jistě platí  $k \geq 2$ , neboť hranu  $uv$  jsme odebrali. Pozorujeme, že

- neexistuje žádná cesta spojující dva vrcholy z  $\{v_0, \dots, v_k\}$ , která leží vně  $C$ ;
- neexistuje žádná cesta spojující dva vrcholy z  $\{v_k, v_{k+1}, \dots, v_l, v_0\}$ , která leží vně  $C$ .

Vskutku, uvažme, že by existovala cesta  $P$  spojující dva vrcholy  $v_i, v_j$  třeba z první množiny, která by ležela vně  $C$ . Pak by přeci cyklus

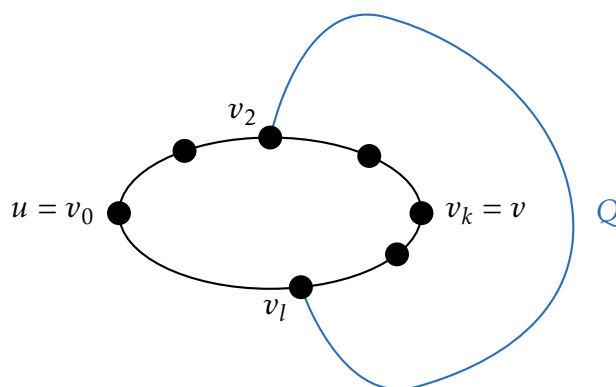
$$v_0v_1 \cdots v_i P v_j v_{j+1} \cdots v_lv_0$$

obsahoval  $u$  i  $v$  a uvnitř aspoň o jednu stěnu víc než  $C$  (vizte [obrázek 63](#)). Tím bychom dostali spor s maximalitou  $C$ .

Obrázek 63: Cesta  $P$  spojující vrcholy  $v_i$  a  $v_j$ .

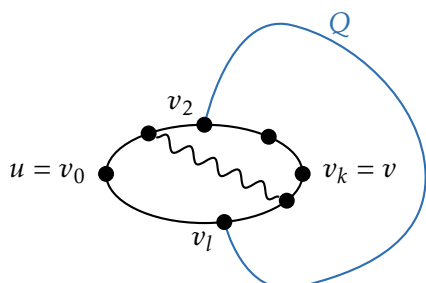
Z předpokladu minimality  $G$  nelze přikreslit hranu  $uv$  ke zvolenému nakreslení  $H$  bez křížení. To ovšem znamená, že musí existovat cesta, která, spojujíc dva vrcholy cyklu  $C$ , ležíc mimo něj a „obklopujíc“ buď vrchol  $u$  nebo vrchol  $v$ , brání tomuto přikreslení.

Konkrétně, musí existovat cesta  $Q$  spojující vrchol z  $\{v_1, \dots, v_{k-1}\}$  s vrcholem z  $\{v_{k+1}, \dots, v_l\}$  nakreslená vně cyklu  $C$  jako na [obrázku 64](#).

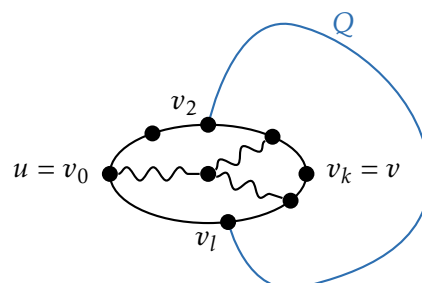
Obrázek 64: Cesta  $Q$  bránící přikreslení hrany  $uv$ .

Dále, tato cesta  $Q$  nemůže být nakreslena bez křížení uvnitř cyklu  $C$ , jinak by existovalo nakreslení  $H$ , kam by bylo lze hranu  $uv$  přikreslit vně  $C$  a získat tak rovinné nakreslení  $G$ . To ovšem znamená, že navíc musí existovat nějaká struktura uvnitř cyklu  $C$ , která brání nakreslení cesty  $Q$ . Taková struktura musí v zásadě neumožnit průchod od vrcholu  $u$  do vrcholu  $v$  vnitřkem cyklu  $C$ .

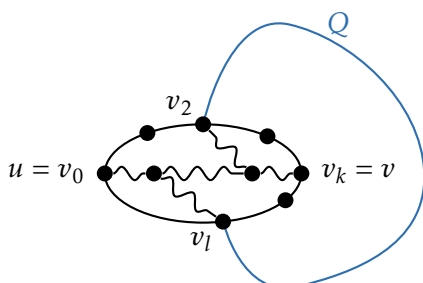
Není obtížné si rozmyslet (**zkuste si to!**), že ona struktura nabývá nutně jedné ze čtyř podob na [obrázku 65](#).



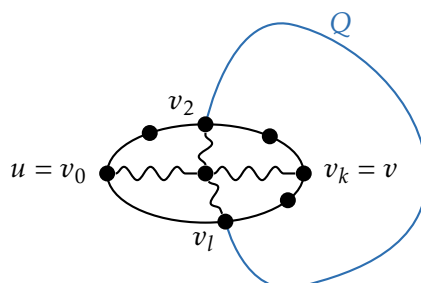
(a) Případ 1.



(b) Případ 2.



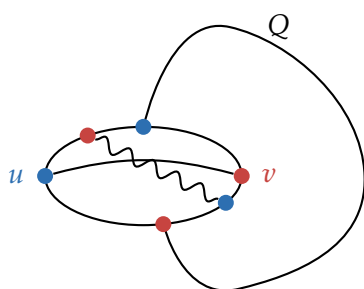
(c) Případ 3.



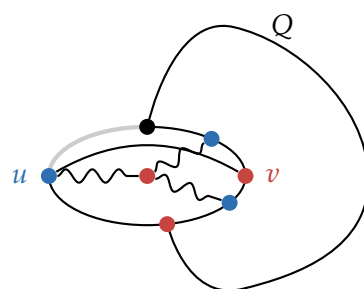
(d) Případ 4.

Obrázek 65: Možné struktury uvnitř  $C$  bránící nakreslení cesty  $Q$ .

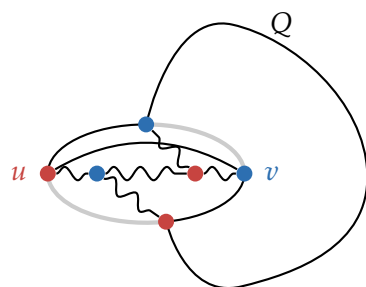
Zbývá si všimnout, že v každém z těchto případů vznikne přidáním hrany  $uv$  podgraf, který je dělením  $K_{3,3}$  nebo  $K_5$  jak vidno na [obrázku 66](#).



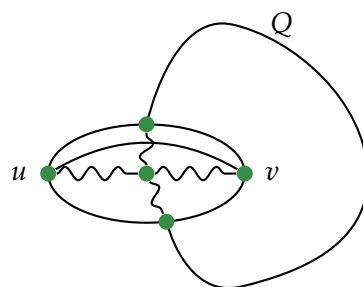
(a) Případ 1.



(b) Případ 2.



(c) Případ 3.



(d) Případ 4.

Obrázek 66: Vyznačená dělení  $K_{3,3}$  a  $K_5$  uvnitř cyklu  $C$  po přidání hrany  $uv$ .

Tím jsme konečně dospěli ke sporu, neboť jsme předpokládali, že  $G$  je nerovinný graf neobsahující dělení  $K_{3,3}$  ani dělení  $K_5$ . Úspěšně jsme zakončili důkaz [Kuratowského věty](#).  $\square$



## Seznam cvičení

### Úvodní pojmy

- (1) Dokažte [Tvrzení 2.4.3](#).
- (2) Dokažte, že relace (ne nutně ekvivalence!)  $R$  je transitivní, právě tehdy když  $R \circ R \subseteq R$ .
- (3) Vyřešte následující úlohy rozprostřené po [sekci 2.5](#). Konkrétně,
  - dokažte, že mezi dvěma konečnými množinami různé velikosti neexistuje žádná bijekce.
  - pro množinu  $A$  velikosti  $n$  určete počet různých bijektivních zobrazení  $f : [n] \cong A$ .
  - určete, jakou podmínku splňují zobrazení  $f : A \rightarrow B$ , ke kterým existuje zobrazení inverzní.
- (4) Dokažte, že každá lineární funkce  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , tedy funkce daná předpisem
$$f(x) = ax + b \quad \text{pro } a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$$
je bijektivní zobrazení.
- (5) Nechť  $A$  je konečná množina. Zformulujte důkaz, že libovolné zobrazení  $f : A \rightarrow A$ , které je definované pro každé  $x \in A$ , je **prosté, právě tehdy když je na**.
- (6) Najděte příklad zobrazení  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  definovaného na celém  $\mathbb{N}$ , které je
  - (a) prosté, ale není na.
  - (b) na, ale není prosté.
- (7) Udělejte cvičení rozmístěná po [sekci 2.6](#). Konkrétně,
  - (a) dokažte, že Hasseho diagram každého lineárního uspořádání má stejný tvar jako diagram na [obrázku 13](#).
  - (b) dokažte, že relace dělitelnosti  $|$  je uspořádání na každé podmnožině přirozených čísel.
- (8) Explicitně popište všechny relace (na libovolné množině), které jsou zároveň ekvivalencí a (částečným) uspořádáním.

(9) Řekněme, že  $R$  a  $S$  jsou uspořádání na množině  $A$ . Které z následujících relací jsou také uspořádáními na  $A$ ?

- $R \cap S$
- $R \cup S$
- $R \setminus S$
- $R \circ S$

(10) Dokažte indukcí, že

$$\sum_{i=1}^n i 2^i = (n-1)2^{n+1} + 2.$$

(11) Tak zvaná *Fibonacciho* posloupnost je definována tak, že další člen dostanu jako součet dvou předchozích. Formálně,  $F_0 = 0, F_1 = 1$  a  $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ , kde  $n \in \mathbb{N}$ . Dokažte indukcí, že

$$F_n \leq \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1}$$

pro všechna  $n \geq 0$ .

(12) Nakresleme  $n$  přímk v rovině, a to tak, že

- žádné 2 nejsou rovnoběžné a
- žádné 3 se neprotínají v jednom bodě.

Dokažte indukcí, že takhle nakreslené přímky rozdělují rovinu na  $n(n+1)/2 + 1$  částí.

### Počítání

(1) Dokažte [Tvzení 3.1.2](#) indukcí podle velikosti množiny  $A$ .

(2) Určete počet všech uspořádaných dvojic  $(A, B)$ , kde  $A \subseteq B \subseteq \{1, \dots, n\}$ .

(3) Spočítejte složení  $\sigma\tau$  a  $\tau\sigma$ , když

- (a)  $\sigma = (143)(26), \tau = (146)(253)$ ,
- (b)  $\sigma = (14)(25)(36), \tau = (123456)$ ,
- (c)  $\sigma = (145)(263), \tau = (154)(236)$ .

(4) Určete řád permutace  $\sigma$ , kde

- (a)  $\sigma = (1345)$ ,  
 (b)  $\sigma = (1346)(28)(579)$ .

- (5) (těžké) Určete číslo  $C_n(S_X)$ , kde  $\#X = 100$  a  $n \leq 50$ , tedy počet všech permutací na 100 číslech s aspoň jedním cyklem délky menší nebo rovné 50.

Samozřejmě jich je  $100! - C_{\geq 51}(S_X)$ , ale cílem úlohy je spočítat je nějak chytře, aby člověk dostal hezčí vzoreček.

- (6) Ať  $\sigma \in S_n$ , tedy  $\sigma$  je permutace množiny  $\{1, \dots, n\}$ . Řekneme, že  $\sigma$  *invertuje* dvojici  $(i, j)$ , kde  $i, j \in \{1, \dots, n\}$ , když  $i < j$ , ale  $\sigma(i) > \sigma(j)$ .

Definujme

$$I(\sigma) := \{(i, j) \in \{1, \dots, n\}^2 \mid \sigma \text{ invertuje } (i, j)\},$$

čili  $I(\sigma)$  je množina všech dvojic  $(i, j)$ , které  $\sigma$  invertuje. Uvědomme si, že  $I(\sigma)$  je podmnožinou  $\{1, \dots, n\}^2$ , čili relací na  $\{1, \dots, n\}$ .

- (a) Dokažte, že  $I(\sigma)$  je transitivní relace na  $\{1, \dots, n\}$  pro každou permutaci  $\sigma \in S_n$ .  
 (b) (těžké) Navrhněte algoritmus, který pro danou permutaci  $\sigma \in S_n$  spočte  $\#I(\sigma)$ .  
 (c) Spočítejte počet invertovaných dvojic, čili  $\#I(\sigma)$ , permutací  $\sigma = (134)(579)(26)$ .

- (7) Dokažte, že

$$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i}^2 = \binom{2n}{n}.$$

**Hint:** použijte [lemma 3.3.6](#).

- (8) Dokažte vzorec

$$\sum_{k=r}^n \binom{k}{r} = \binom{n+1}{r+1}$$

pro pevné  $r \in \mathbb{N}$  indukci podle  $n \in \mathbb{N}$ .

- (9) (těžké) Kolik existuje podmnožin  $\{1, \dots, n\}$ , které neobsahují žádná dvě po sobě jdoucí čísla. Formálně, určete velikost množiny

$$\{A \subseteq \{1, \dots, n\} \mid \{i, j\} \not\subseteq A, \text{ kdykoli } |i - j| = 1\}.$$

- (10) Ať  $p$  je prvočíslo a  $k, n$  přirozená čísla.

- (a) Dokažte, že pro  $k < p$  je  $\binom{p}{k}$  dělitelné  $p$ .
- (b) Dokažte, že  $\binom{n}{p}$  je dělitelné  $p$  právě tehdy, když  $\lfloor n/p \rfloor$  je dělitelné  $p$ , kde  $\lfloor \cdot \rfloor$  značí *dolní celou část*.
- (11) Budeme vybírat  $k$ -tice předmětů z  $n$  druhů předmětů. Budeme uvažovat různé typy výběru podle toho, jestli vybíráme  $k$ -tice uspořádané, nebo neuspořádané (tj. podmnožiny) a též podle toho, zda každého druhu je vždy jen jeden předmět, či nikoli. Doplňte následující tabulku:

	Jen 1 předmět každého druhu	Libovolně mnoho předmětů každého druhu
Uspořádané $k$ -tice		
Neuspořádané $k$ -tice		

Tabulka 2: Výběr  $k$ -tic předmětů z  $n$  druhů předmětů.

- (12) Kolika způsoby můžeme postavit 7 čarodějnic a 5 vodníků do řady tak, aby 2 vodníci nikdy nestáli vedle sebe?
- (13) Jeden z oblíbených a celkem rychlých rozkladů čísla na prvočísla je tzv. *Eratosthenovo síto*.  
 Funguje na principu vyškrtávání násobků čísel. Konkrétně, algoritmus prochází seznam čísel až do nějaké hranice, a kdykoli narazí na ještě neodškrtnuté číslo, odškrtně z tohoto seznamu všechny jeho násobky kromě něho samotného. Sami si rozmyslete, že tímto způsobem zůstanou ve výsledném seznamu pouze prvočísla.  
 My si tady rozmyslíme pouze zjednodušenou verzi. Spočtete, kolik zůstane čísel mezi 1 a 1000 potom, co vyškrtáme všechny násobky čísel 2, 3, 5 a 7.
- (14) Určete počet přirozených čísel menších než 100, které nedělí druhá mocnina žádného přirozeného čísla (kromě 1).
- (15) Kolika způsoby lze seřadit do řady 5 Čechů, 4 Maďary a 3 Rusy, aby všichni příslušníci jednoho národa nikdy nestáli hned za sebou?

### Teorie grafů

- (1) Nakreslete graf  $G = (V, E)$ , kde
- $V = \{1, \dots, 5\}, E = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{3, 4\}, \{4, 5\}\}.$
  - $V = \{1, \dots, 5\}, E = \binom{V}{2}.$
  - $V = \{1, \dots, 8\}, E = \{e_1, \dots, e_8\}$  a
    - $t(e_i) = s(e_{i+1}) = i + 1$  pro všechna  $i \leq 7,$
    - $t(e_8) = s(e_1) = 1.$
- (2) Popište všechny grafy  $G = (V, E)$ , kde  $E$  je relace na  $V$ , která je antireflexivní, symetrická (to je součástí definice grafu) a navíc **transitivní**.
- (3) Ať  $V$  je konečná množina a  $E$  je relace na  $V$ , která je antireflexivní a symetrická. Definujme navíc na  $E$  další relaci  $\sim$  předpisem

$$(v, v') \sim (w, w') \Leftrightarrow (v, v') = (w, w') \vee (v, v') = (w', w).$$

Dokažte, že pak existuje bijekce mezi  $[E]_{\sim}$  a množinou

$$E' := \{\{v, v'\} \mid (v, v') \in E\},$$

čili mezi množinou tříd ekvivalence  $E$  podle  $\sim$  a množinou, kterou dostanu tak, že z uspořádaných dvojic v  $E$  udělám neuspořádané dvojice, tj. dvouprvkové podmnožiny. Pro intuici vizte poznámku pod [definicí 4.0.1](#).

- (4) Spočítejte, kolik existuje grafů na  $n$  vrcholech.
- (5) Ať  $\mathcal{P}_1 = e_1^1 e_2^1 \dots e_n^1$  a  $\mathcal{P}_2 = e_1^2 e_2^2 \dots e_n^2$  jsou cesty. Za předpokladu, že  $t(e_n^1) = s(e_1^2)$ , definujeme jejich *sloučení*, které zapíšeme třeba jako  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$ , přirozeně jako posloupnost hran

$$\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2 := e_1^1 e_2^1 \dots e_n^1 e_1^2 e_2^2 \dots e_n^2.$$

Určete, pro jaké cesty (v obecném grafu)  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2$  platí, že

- $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_2 \oplus \mathcal{P}_1$ ;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  cesta;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  tah;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  sled;
- je  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{P}_2$  cyklus.

- (6) Dokažte, že je-li  $T = (V, E)$  strom, pak  $\#E = \#V - 1$ .
- (7) Spočítejte, kolik existuje stromů na  $n$  vrcholech.
- (8) (těžké) Ať  $V$  je množina  $n$  bodů v rovině. Pro každé dva body  $x, y \in V$  definujme váhu hrany  $xy$  jako vzdálenost bodů  $x$  a  $y$ . Čili, pokud  $x = (x_1, x_2)$  a  $y = (y_1, y_2)$ , pak

$$w(xy) := \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}.$$

Vzniklý graf označme obyčejně  $G$ .

- (a) Ukažte, že v každé minimální kostře  $G$  vede z každého vrcholu maximálně 6 hran.
- (b) Ukažte, že existuje minimální kostra  $G$ , jejíž hrany se (jakožto úsečky v rovině) nekříží.
- (9) *Úplným grafem* na  $n$  vrcholech myslíme graf  $G = (V, \binom{V}{2})$ , tedy graf, mezi každým párem jehož vrcholů vede hrana. Takový graf se obvykle značí  $K_n$ . Najděte minimální kostru  $K_n$  a spočítejte její váhu (tj. součet vah všech jejích hran), je-li  $V = \{1, \dots, n\}$  a
- (a)  $w(ij) = \max(i, j)$ ,
- (b)  $w(ij) = i + j$ ,
- pro všechny páry  $i, j \leq n$ .
- (10) Dokažte, že když  $w$  (tj. ohodnocení  $G$ ) je prosté zobrazení, pak je minimální kostra  $G$  určena jednoznačně.
- (11) Dokažte, že [Floydův-Warshallův](#) algoritmus selže, když připustíme i záporná ohodnocení hran.
- (12) Vyřešte [úlohu o rodinném výletu](#) pro graf daný [obrázkem 45](#).
- (13) Rozmyslete si, jak upravit zobrazení

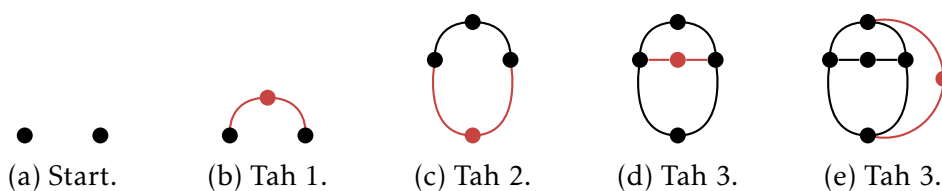
$$\varepsilon : V \times V \rightarrow \{0, 1\}$$

definující hranovou strukturu na množině vrcholů tak, aby zahrnovalo i všechny **ohodnocené** grafy.

- (14) (těžké) Kolik nejvíce hran může mít graf s  $n$  a  $k$  komponentami souvislosti?

- (15) Ať  $V$  je **konečná** množina a  $d : V \times V \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  je metrika na  $V$ . Dokažte, že pak existuje graf  $G = (V, E)$  takový, že  $d_G(u, v) = d(u, v)$  pro všechny  $u, v \in V$ .
- (16) Navrhněte efektivní algoritmus, který pro zadaný graf  $G = (V, E)$  rozhodne, zda je souvislý, a pokud není, najde jeho rozklad na komponenty souvislosti.
- (17) Najděte rovinný graf, jehož všechny vrcholy mají stupeň 5 (vizte [definici 4.6.15](#)).
- (18) Ukažte, že odhad  $\#E \leq 2\#V - 4$  pro rovinný graf  $G = (V, E)$  bez trojúhelníků je nejlepší možný. To jest, pro libovolné  $n \in \mathbb{N}$  zkonstruuje rovinný graf s  $n$  vrcholy a  $2n - 4$  hranami.
- (19) Hra „sprouts“ vynalezená J. H. Conwayem a M. S. Patersonem má následující pravidla:
- Na papíře je nakresleno  $n \in \mathbb{N}$  puntíků.
  - Hráči se střídají po tazích, a kdo nemůže táhnout, prohrává.
  - V každém tahu spojí hráč dva existující puntíky obloukem a někde na tento oblouk nakreslí nový puntík.
  - Puntík je možné použít jako jeden z konců nového oblouku jedině tehdy, když v něm končí nanejvýš dva již nakreslené oblouky.

Na [obrázku 67](#) vizte příklad 4 prvních tahů pro  $n = 2$ .



Obrázek 67: Příklad prvních čtyř tahů hry *sprouts* pro  $n = 2$ .

Dokažte, že

- (a) pro  $n$  počátečních puntíků má tato hra maximálně  $3n - 1$  tahů;
- (b) (těžké) pro  $n$  počátečních puntíků má tato hra **nejméně**  $2n$  tahů (bez ohledu na strategii hráčů).