

Teória množín pre učiteľov

Martin Sleziak

22. septembra 2026

Obsah

1	Úvod	4
1.1	Sylaby a literatúra	4
1.1.1	Literatúra	4
1.1.2	Sylaby predmetu	4
1.1.3	Stará a nová akreditácia	4
1.2	Niečo z histórie	5
1.3	Základné označenia	6
2	Množiny a práca s nimi	7
2.1	Logika prvého rádu	7
2.1.1	Výroková logika	7
2.1.2	Výroky s kvantifikátormi	9
2.2	Operácie s množinami	14
2.3	Usporiadané dvojice a karteziánsky súčin	21
2.4	Funkcie	23
2.4.1	Karteziánsky súčin funkcií	26
3	Kardinálne čísla	28
3.1	Porovnávanie mohutností množín	28
3.2	Kardinálna aritmetika	32
3.2.1	Vlastnosti sčítovania kardinálov	34
3.2.2	Vlastnosti násobenia kardinálov	36
3.2.3	Vlastnosti kardinálneho umocňovania	39
3.3	Cantorova veta a diagonálna metóda	47
3.4	Spočítateľné a nespočítateľné množiny	48
3.5	Mohutnosť niektorých v praxi sa vyskytujúcich množín	50
3.6	Aplikácie kardinálnych čísel	57
3.6.1	Existencia transcendentných čísel	57
3.6.2	Vypočítateľné funkcie	57
4	Axiomatický prístup k teórii množín	59
5	Axióma výberu	60
6	Ešte raz Cantor-Bernsteinova veta	61
6.1	Iný dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety	61
6.1.1	Zopár príkladov ako môžeme dostať hľadanú bijekciu	62
6.1.2	Dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety	70
6.2	Cantor-Bernsteinova veta a pevné body	72

6.3	Hľadanie pevných bodov	77
6.3.1	Ako sa dostať iteráciami k pevnému bodu	77
6.3.2	Babylonská metóda hľadania odmocniny	80
	Register	85
	Zoznam symbolov	87

Kapitola 1

Úvod

Verzia: 22. septembra 2026

1.1 Sylaby a literatúra

1.1.1 Literatúra

Pri príprave týchto poznámok som čerpal najmä z kníh [BŠ, D, ŠS]. V častiach o histórii teórie množín som čerpal hlavne z [BŠ, GG, Z]. Samozrejme, pomohli mi aj rôzne internetové zdroje ako napríklad [WIK], blogy rôznych matematikov, s niektorým úlohami, ktoré uvádzam ako cvičenia, som sa stretol na rôznych matematických diskusných fórach. Mnohé cvičenia som prebral z [L, ŠS].

Kniha [ŠS] je veľmi zrozumiteľne písaná a je určená pre študentov učiteľských odborov. Kniha [BŠ] je náročnejšia a obsahuje aj veľmi pokročilé časti, ktoré výrazne presahujú obsah tohoto kurzu. Prvé dve jej kapitoly zhruba zodpovedajú tomu, čo budeme preberať.¹ Z ďalších textov dostupných v slovenčine alebo češtine spomeňme ešte [B2]. Pokiaľ ste schopní čítať text v angličtine, ľahko nájdete veľké množstvo ďalších výborných textov o teórii množín.

1.1.2 Sylaby predmetu

Zermelov-Fraenkelov axiomatický system teórie množín. Kardinálne čísla a kardinálna aritmetika. Spočítateľné a nespočítateľné množiny. Mohutnosť kontinua a kardinalita množín vyskytujúcich sa v školskej matematike. Axióma výberu, jej ekvivalenty a dôsledky.

1.1.3 Stará a nová akreditácia

Explicitne upozorním na to, že pri prechode na novú akreditáciu sa o niečo zmenili obsah tohoto predmetu. Dôležitým rozdielom ja aj to, že teraz už veci z tohoto predmetu nie sú súčasťou štátnych skúšok. Tomu som prispôbil aj učebný text – vynechal časti, ktoré sa nepreberajú a pri preberanej látke mierne upravil poradie.

Na mojej stránke nájdete aj text vytvorený keď predmet bežal podľa starej akreditácie [Sl2]. Je možné, že bude pre niekoho zaujímavý – pre ľudí, ktorý absolvujú tento predmet

¹Jeden exemplár [BŠ] sa kedysi nachádzal aj v knižnici na átriových domkoch – ak tá knižnica ešte funguje, možno ju tam zoženiete. Obe knihy by však mali byť u nás pomerne dostupné. Ak by ste však mali záujem prečítať si akúkoľvek literatúru, ktorú v tomto texte citujem a nepodarilo by sa vám ju zohnať, pokojne sa obráťte na mňa.

v súčasnej podobe, tam však je pomerne veľa informácií navyše a je pre nich užitočnejší tento text. Aby som ich odlíšil, pri staršom texte som nechal pôvodný názov „2-UMA-115 Teória množín“ a nový text je nazvaný „Teória množín pre učiteľov“. (Je to asi o niečo jasnejšie odlíšenie, než ich rozlíšiť iba ako 2-UMA-115/00 a 2-UMA-115/15.)

1.2 Niečo z histórie

*No one shall expel us from the Paradise that Cantor has created.
(Nikto nás nevyženie z raja stvoreného Cantorom.)*

David Hilbert

V rámci tejto prednášky sa budeme venovať teórii množín. Na úvod by bolo azda vhodné povedať aspoň stručne niečo o tom, ako a prečo vznikla. Pokiaľ sa chcete dozvedieť viac, ako veľmi pekný (a súčasne stručný) text o histórii modernej teórie množín by som vám odporučil [BŠ, s.11-s.25]. (Túto úvodnú kapitolu nazvali autori spomínanej knihy „Romance matematické analýzy a teórie množín“.)

Za zakladateľa teórie množín je všeobecne považovaný *Georg Cantor* (hoci niektoré idey možno nájsť napríklad aj v dielach *Bernarda Bolzana*). Za základnú tézu teórie množín môžeme prehlásiť možnosť uchopiť viacero objektov ako jediný objekt (ich množinu).² Matematikovi na celom svete veľmi prekvapil Cantorov dôkaz, že existuje nekonečne veľa transcendentných reálnych čísel, uverejnený v roku 1874. Originálna bola najmä metóda dôkazu – Cantor dokázal tento výsledok bez toho, aby nejaké takéto číslo skonštruoval. Tento dôkaz si v rámci tejto prednášky aj ukážeme. Sami budete mať možnosť vidieť, že po vybudovaní potrebného aparátu je už tento dôkaz veľmi jednoduchý – na rozdiel od konštruktívneho dôkazu existencie transcendentných čísel pochádzajúceho od Josepha Liouvillea.

Teória množín sa u mnohých matematikov stretla s výrazným odporom. Dôvody boli rôzne, jedným z nich bol aj nekonštruktívny charakter viacerých dôkazov – ako napríklad v prípade existencie transcendentných čísel. Tento odpor ešte zosilnel po objavení viacerých paradoxov (sporov) v teórii množín, o ktorých budeme hovoriť o chvíľu.

V Cantorových prácach sa objavilo mnoho dôležitých výsledkov z teórie množín – dá sa povedať, že väčšina z tých, s ktorými sa v rámci tejto prednášky stretneme. Stále však nešlo o axiomatickú teóriu množín. Cantorov prístup, pri ktorom bol pojem množiny chápaný intuitívne a pomerne voľne, sa zvykne nazývať *naivná teória množín*. Na mnohé účely je tento prístup úplne postačujúci, v podstate je to presne ten prístup, ktorý ste používali na prednáškach z matematiky, ktoré ste doteraz absolvovali. Začiatkom 20-teho storočia sa však zistilo, že naivný prístup k množinám môže viesť k viacerým paradoxom.

Ako ilustráciu stručne popíšme *Russellov paradox*. (Neskôr sa budeme paradoxami teórie množín zaoberať o niečo podrobnejšie.) Povedali sme si, že základná idea teórie množín je chápať viac objektov ako prvky jedného celku – jednej množiny. Takto môžeme zaviesť množinu všetkých množín, ktorú označíme **Set**. Z tejto množiny môžeme vymedzovať podmnožiny pomocou rôznych vlastností prvkov. Uvažujme vlastnosť $x \notin x$, t.j. množina nie je prvkom samej seba. Táto vlastnosť určí podmnožinu $A = \{x \in \mathbf{Set}; x \notin x\}$. Má aj množina A takúto vlastnosť?

Ak ju má, čiže ak $A \notin A$, tak podľa definície množiny A má platiť $A \in A$, čo je spor.

Obrátene, ak túto vlastnosť nemá, tak $A \in A$. Ale do množiny A patria len množiny s uvedenou vlastnosťou. To znamená, že $A \notin A$ a opäť dostávame spor.

²Takto napísané to znie asi pomerne naivne – ale asi nie je reálne očakávať, že sa podarí vystihnúť podstatu celej teórie v jednej vete. Treba dúfať, že jej podstatu pochopíte po tomto jednosemestrovom kurze.

Pokiaľ nechceme teóriu množín zavrhnúť úplne, mali by sme sa pokúsiť nejako takýmto problémom predísť. Možný prístup, ako riešiť tento problém, predstavuje *axiomatická teória množín*, v ktorej sa zavedú axiómy, ktoré obmedzia to aké množiny sa dajú tvoriť a zabránia vzniku Russellovho paradoxu. My sa budeme zaoberať najmä naivnou teóriou množín, axiomatickú teóriu množín spomenieme len stručne ku koncu prednášky.

1.3 Základné označenia

Budeme používať štandardné označenia:

$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$ je množina prirodzených čísel (čiže na tejto prednáške považujeme aj nulu za prirodzené číslo)

$\mathbb{Z}$ = celé čísla

$\mathbb{Q}$ = racionálne čísla

$\mathbb{R}$ = reálne čísla

$\mathbb{C}$ = komplexné čísla

Kapitola 2

Množiny a práca s nimi

V tejto kapitole by sme si chceli ukázať základy práce s množinami a niektoré vlastnosti operácií s množinami.

Pracujeme v naivnej teórii množín, kde množinu chápeme jednoducho ako súhrn objektov určených nejakou vlastnosťou.

S množinami budeme pracovať napriek tomu, že sme si povedali len pomerne vágnu definíciu množiny a videli sme, že takýto naivný prístup môže viesť k problémom (Russellov paradox v časti 1.2). Na problémy však nenarazíme, ak budeme pracovať so základnými číselnými množinami, ktoré dobre poznáme – ako napríklad $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ – a s množinami, ktoré z nich vieme pomocou niektorých operácií vytvoriť.

Ako príklady množín teda môžeme uviesť napríklad:

$$A = \{1, 2, 3, 4\}$$

$$B = \{x \in \mathbb{N}; (\exists a, b \in \mathbb{N}) a^2 + b^2 = x\}$$

$$C = \{2x; x \in \mathbb{N}\}$$

V týchto príkladoch je množina A definovaná tak, že sú vymenované všetky jej prvky. Množina B je množina tých prirodzených čísel, ktoré sa dajú dostať ako súčty dvoch štvorcov. Množina C je množina párnych prirodzených čísel. Ďalšie množiny z nich môžeme vytvárať pomocou rôznych operácií, o ktorých budeme hovoriť v tejto kapitole, t.j. napríklad $A \cap B$, $C \setminus B$, $A \times \mathbb{N}$ a podobne.

2.1 Logika prvého rádu

Ešte predtým, než sa začneme zaoberať množinami ako takými, povieme si niečo o logike prvého rádu, ktorá sa zaoberá výrokmi vytvorenými pomocou logických spojok a kvantifikátorov.

Logikou prvého rádu sa nebudeme zaoberať detailne, zjednodušene povedané, je to súhrn pravidiel pre prácu s výrokmi, ktoré sú v súlade s tým, ako obvykle uvažujeme. Ak by ste sa chceli o prvorádovej logike dozvedieť viac, môžete si o nej prečítať v knihách a textoch venovaných čisto tejto problematike, ako napríklad [B1, E, So, Š].

2.1.1 Výroková logika

Pripomenieme si niektoré pravidlá na overovanie pravdivosti výrokov, ktoré už poznáte z nižších ročníkov. Za výrok môžeme považovať akékoľvek tvrdenie, ktoré môže byť pravdivé alebo

nepravdivé.

Definícia 2.1.1. *Negáciou* výroku p rozumieme výrok „neplatí p “. Označujeme ju $\neg p$.

Pre dva výroky p a q nazývame ich *konjunkciou* výrok „ p a q “, označujeme $p \wedge q$.

Disjunkcia je výrok „ p alebo q “, označujeme $p \vee q$.

Pod *implikáciou* rozumieme výrok „ak platí p , tak platí q “, označujeme $p \Rightarrow q$.

Ekvivalencia výrokov p a q je výrok „ p platí práve vtedy, keď platí q “, označujeme $p \Leftrightarrow q$.

Tieto definície logických spojok sú zhrnuté v nasledujúcich pravdivostných tabuľkách.¹

p	$\neg p$	p	q	$p \wedge q$	p	q	$p \vee q$	p	q	$p \Rightarrow q$	p	q	$p \Leftrightarrow q$
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Definícia 2.1.2. *Tautológiou* nazývame taký výrok, zložený z výrokových premenných a logických spojok, ktorý je vždy pravdivý, bez ohľadu na pravdivosť výrokových premenných, ktoré v ňom vystupujú.

Tautológie môžeme overovať jednoducho tabuľkovou metódou, ktorú poznáte z nižších ročníkov a pravdepodobne i zo strednej školy.

Príklad 2.1.3. Overme napríklad tautológiu $p \vee (\neg p)$ (princíp vylúčenia tretieho).

p	$\neg p$	$p \vee \neg p$
1	0	1
0	1	1

Ako ďalší príklad ukážeme overenie jedného z de Morganových pravidiel.

Príklad 2.1.4. *De Morganove pravidlá* sú pravidlá ako negovať konjunkciu a disjunkciu.

$$\begin{aligned}\neg(p \wedge q) &\Leftrightarrow \neg p \vee \neg q \\ \neg(p \vee q) &\Leftrightarrow \neg p \wedge \neg q\end{aligned}$$

Samozrejme, pretože teraz vo výroku vystupuje viacero premenných, budeme potrebovať viac riadkov tabuľky na to, aby sme vyčerpali všetky možnosti.

p	q	$p \vee q$	$\neg(p \vee q)$	$\neg p \wedge \neg q$	$\neg(p \vee q) \Leftrightarrow (\neg p \wedge \neg q)$
1	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1
0	0	0	1	1	1

Niekedy si môžeme pri overovaní platnosti tautológie použiť aj jednoduchší postup. V predchádzajúcom príklade sme napríklad mohli na základe symetrie overovať o jeden riadok menej. Inú možnosť zjednodušenia ilustruje nasledujúci príklad.

¹Na označovanie pravdivosti a nepravdivosti budeme v tabuľke používať symboly 1 a 0. Niekedy sa zvyknú používať aj T a F, ako skratky pre anglické true a false.

Príklad 2.1.5. Dokážeme tautológiu $(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow (\neg q \Rightarrow \neg p)$. (Táto tautológia súvisí s princípom nepriameho dôkazu. Implikácia $\neg q \Rightarrow \neg p$ sa zvykne nazývať *obmena implikácie* $p \Rightarrow q$.)

Aby sme dokázali ekvivalenciu dvoch výrokov, stačí ukázať, že výrok na ľavej strane je nepravdivý práve v tých prípadoch, kedy je nepravdivý výrok na pravej strane.

Implikácia je nepravdivá jedine v prípade, že ľavý výrok je pravdivý a pravý je nepravdivý (prípád $1 \Rightarrow 0$). Teda výrok $p \Rightarrow q$ je nepravdivý práve vtedy, keď $p = 1$ a $q = 0$. Podobne, aby bol výrok $\neg q \Rightarrow \neg p$ nepravdivý, musí byť $\neg q = 1$ a $\neg p = 0$, čo je presne ten istý prípad $p = 1$ a $q = 0$. Vidíme, že obe strany ekvivalencie majú vždy tú istú pravdivostnú hodnotu.

(Tento spôsob overenia tautológie sa až tak veľmi nelíši od tabulkovej metódy – vlastne sme si len rozmysleli, v ktorých riadkoch tabuľky sa na oboch stranách uvedenej ekvivalencie vyskytnú 0 – zdá sa mi byť bližší ku spôsobu, ako prirodzene uvažujeme o výrokoch.)

Tu je overenie tej istej tautológie tabuľkou:

p	q	$\neg q$	$\neg p$	$p \Rightarrow q$	$\neg q \Rightarrow \neg p$	$(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow (\neg q \Rightarrow \neg p)$
1	1	0	0	1	1	1
1	0	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1
0	0	1	1	1	1	1

V cvičení 2.1.1 nájdete viacero tautológií. Je dobré si uvedomiť ako súvisia tautológie s niektorými typmi dôkazov. Tautológia z príkladu 2.1.5 je presne princíp nepriameho dôkazu, ktorý sme už spomínali. Tautológia z cvičenia 2.1.1b) sa tiež často používa pri dokazovaní – namiesto výroku tvaru $p \Leftrightarrow q$ dokážeme zvlášť jednotlivé implikácie $p \Rightarrow q$ a $q \Rightarrow p$.

Disjunktívna normálna forma

Logické spojky môžeme chápať ako binárne operácie na množine $\{0,1\}$, čiže funkcie z $\{0,1\} \times \{0,1\}$ do $\{0,1\}$. Existuje teda celkovo 16 možných logických spojok. (Inak: $2^4 = 16$ spôsobov ako vyplniť tabuľku so 4 riadkami.) Okrem spojok $\wedge$, $\vee$, $\Leftrightarrow$, $\Rightarrow$, ktoré sme zvyknutí používať, dostaneme aj niektoré menej obvyklé; napríklad spojku, ktorá bez ohľadu na hodnoty p a q má vždy hodnotu 1.

Všetky možné logické spojky môžeme dostať pomocou $\neg$, $\wedge$ a $\vee$. Ak napríklad chceme dostať spojku s tabuľkou

p	q	$p * q$
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

tak to môžeme dosiahnuť takto: $(p \wedge q) \vee (\neg p \wedge q) \vee (\neg p \wedge \neg q)$. Inak povedané, použili sme disjunkciu formúl z ktorých každá je pravdivá pre jediný riadok v tabuľke; a pridali sme tie formuly v ktorých chceme, aby v tabuľke bola jednotka. Rovnaký postup by sme vedeli použiť aj keby sme mali viac premenných. (Jediný prípad, kedy to nefunguje, je spojka, ktorá je vždy rovná 0 – museli by sme použiť disjunkciu 0 formúl. Tú ale vieme dostať napríklad ako $p \wedge \neg p$.)

Zápis v takomto tvare sa zvykne nazývať *disjunktívna normálna forma*.

2.1.2 Výroky s kvantifikátormi

Okrem logických spojok, ďalším nástrojom pomocou ktorého môžeme vytvárať zložitejšie tvrdenia z jednoduchších, sú *kvantifikátory*. V nasledujúcej definícii $P(x)$ označuje *výrokovú funkciu*, čím rozumieme to, že po dosadení akéhokolvek objektu za x dostaneme výrok.

Definícia 2.1.6. Výrok $(\forall x)P(x)$ znamená, že pre každý objekt x platí výrok $P(x)$. Symbol $\forall$ nazývame *všeobecný kvantifikátor*.

Výrok $(\exists x)P(x)$ znamená, že existuje taký objekt x , pre ktorý platí výrok $P(x)$. Symbol $\exists$ nazývame *existenčný kvantifikátor*.

V praxi obvykle i tak budeme chcieť hovoriť nie o všetkých objektoch, ale objektoch z nejakej konkrétnej množiny A . Budeme preto používať nasledujúce zápisy²

$$\begin{aligned} (\forall x \in A)P(x) &\stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\forall x)(x \in A \Rightarrow P(x)) \\ (\exists x \in A)P(x) &\stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\exists x)(x \in A \wedge P(x)) \end{aligned}$$

Čiže $(\exists x \in A)P(x)$ je len skrátenejší zápis toho, že existuje x , ktoré súčasne patrí do množiny A a spĺňa výrok $P(x)$.

Na overovanie platnosti tvrdení s kvantifikátormi už nemáme k dispozícii jednoduchú metódu, podobnú vyplneniu tabuľky pravdivostných hodnôt. Je možné zaviesť niekoľko pravidiel (axióm), z ktorých sa dajú ostatné tvrdenia odvodzovať. Napríklad pomerne prirodzené sa zdajú byť tieto pravidlá:

Ak platí výrok $(\forall x)P(x)$, tak platí aj výrok $P(a)$ pre daný konkrétny objekt a . (Symbol $P(a)$ označuje výrok, ktorý dostaneme dosadením a namiesto x . Presnejšie povedané, namiesto každého voľného výskytu x – o voľných a viazaných premenných vo výrokoch s kvantifikátormi budeme hovoriť o chvíľu.)

Ak platí $(\exists x)P(x)$ a súčasne platí $P(a) \Rightarrow Q$ (kde a označuje nejaký konkrétny objekt a Q je nejaký výrok), tak platí aj Q .

V tejto prednáške nebudeme vymenovávať všetky používané pravidlá a ukazovať si dôkazy tvrdení pomocou týchto pravidiel – ak by vás táto problematika zaujala, opäť sa môžete obrátiť na prednášky a texty venované špeciálne logike. Pokiaľ budeme chcieť overiť pravdivosť nejakého výroku s kvantifikátormi, budeme sa držať zdravého rozumu – budeme postupovať tak, ako by sme o týchto výrokoch uvažovali v obvyklom jazyku a v každodenných situáciach. (Je pravda, že v každodenných situáciach neuvažujeme o množinách, pokojne si však môžeme pomôcť tým, že pod výrokom $(\forall x)P(x)$ si namiesto „každá množina má vlastnosť $P(x)$ “ na chvíľu predstavíme napríklad výrok „každá guľôčka v tomto vrecku je modrá“, podobne pod $(\exists x)P(x)$ si môžeme predstaviť výrok „niektorá guľôčka v tomto vrecku je modrá“.)

Príklad 2.1.7 (Negácia výrokov s kvantifikátormi). Zdôvodníme platnosť výroku

$$\neg[(\forall x)P(x)] \Leftrightarrow (\exists x)\neg P(x).$$

Ľavá strana uvedenej ekvivalencie znamená, že nie všetky objekty, s ktorými pracujeme majú vlastnosť $P(x)$. To je ale presne to isté, že medzi nimi existuje aspoň jeden objekt, ktorý túto vlastnosť nemá, a teda spĺňa $\neg P(x)$. (Ak nie je pravda, že všetky guľôčky v našom vrecku sú modré, musí byť medzi nimi aspoň jedna inej farby.)

Podobným spôsobom si môžeme ozrejmiť, že platí ekvivalencia

$$\neg[(\exists x)P(x)] \Leftrightarrow (\forall x)\neg P(x).$$

(Túto ekvivalenciu môžeme odvodiť z predchádzajúcej aj jednoducho znegovaním oboch strán v predchádzajúcej ekvivalencii – pozri úlohu 2.1.1e.)

Obidve tieto ekvivalencie často používame, ak potrebujeme znegovať výrok obsahujúci kvantifikátor. Stručne sa dajú zhrnúť tak, že zmeníme kvantifikátor a výrok pod ním znegujeme.

Príklad 2.1.8. Pokúsme sa znegovať výrok

$$R(x) := (\forall x)[P(x) \Rightarrow (\exists y)Q(x, y)].$$

²Tu používame symbol $\in$, pričom $x \in A$ označuje, že x je prvkom množiny A . Významom tohoto symbolu sa budeme zaoberať neskôr, zatiaľ si jednoducho môžete predstaviť, že naše univerzum je v tomto prípade A .

Postupne dostaneme

$$\begin{aligned}\neg R(x) &\Leftrightarrow (\exists x) \neg [P(x) \Rightarrow (\exists y) Q(x, y)] \Leftrightarrow \\ &(\exists x) [P(x) \wedge \neg (\exists y) Q(x, y)] \Leftrightarrow \\ &(\exists x) [P(x) \wedge (\forall y) \neg Q(x, y)]\end{aligned}$$

Okrem pravidiel na negovanie výrokov s kvantifikátormi sme použili negáciu implikácie – pozri príklad 2.1.1f).

Príklad 2.1.9. Skúsme nejaký praktickejší príklad. Najprv sa pokúsme pomocou kvantifikátorov zapísať, že postupnosť reálnych čísel $(x_n)_{n=0}^{\infty}$ konverguje. To znamená, že existuje reálne číslo, ktoré je limitou tejto postupnosti:

$$(\exists L \in \mathbb{R})(\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N})(\forall n \in \mathbb{N})[n > n_0 \Rightarrow |x_n - L| < \varepsilon].$$

Podľa pravidiel, ktoré sme uviedli, je negácia tohoto výroku

$$(\forall L \in \mathbb{R})(\exists \varepsilon > 0)(\forall n_0 \in \mathbb{N})(\exists n \in \mathbb{N})[n > n_0 \wedge |x_n - L| \geq \varepsilon].$$

V matematickej analýze ste možno niekedy použili overenie tohoto výroku na dôkaz toho, že postupnosť nekonverguje.

V skutočnosti sme tak trochu podvádzali – namiesto $(\exists L \in \mathbb{R})(\forall \varepsilon) \dots$ by sme mali podľa našej dohody písať $(\exists L)[L \in \mathbb{R} \wedge \{(\forall \varepsilon) \dots\}]$. (Podobne ako sme to urobili v poslednej časti tvrdenia, ktorú sme mohli zapísať v tvare $(\forall n > n_0)|x_n - L| < \varepsilon$.) Môžete si skúsiť rozmyslieť, že aj keby sme uvedené výroky podrobnejšie rozpísali takýmto spôsobom, ako negáciu by sme dostali to isté. Čiže pravidlá na negovanie výrokov s kvantifikátormi fungujú aj ak premenné vyberáme len z určitej množiny.

Po odbočke venovanej negáciám výrokov s kvantifikátormi sa ešte na chvíľu vráťme k overovaniu pravdivosti takýchto výrokov. V príklade 2.1.7 sme pre daný výrok overili, že je pravdivý. Ukážme si aspoň jeden príklad, kde zdôvodníme, že nejaký výrok obsahujúci kvantifikátory je nepravdivý. (V cvičeniach k tejto podkapitole nájdete ďalšie výroky, o ktorých máte rozhodnúť, či sú pravdivé alebo nie a svoje tvrdenie zdôvodniť.)

Príklad 2.1.10. Chceme overiť, či výrok

$$[(\forall x)P(x) \Rightarrow (\forall x)Q(x)] \Rightarrow [(\forall x)(P(x) \Rightarrow Q(x))]$$

je pravdivý alebo nie. Po chvíli uvažovania prideme na to, že tento výrok asi neplatí. Radi by sme to zdôvodnili tak, že nájdeme konkrétny príklad výrokov, $P(x)$ a $Q(x)$ pre ktoré to neplatí.

Skúsme uvažovať napríklad výroky o reálnych číslach:

$$P(x) := (x > 2)$$

$$Q(x) := (x > 3).$$

(Pokiaľ chceme zdôrazniť, že ide o reálne čísla, môžeme písať $P(x) := (x \in \mathbb{R}) \wedge (x > 2)$ a $Q(x) := (x \in \mathbb{R}) \wedge (x > 3)$. Už sme však uviedli, že sa zaoberáme reálnymi číslami, takže aj keď to explicitne nenapíšeme, všetky výskyty kvantifikátorov chápeme tak, že sa vzťahujú na reálne čísla.)

Pozrime sa najprv na ľavú stranu implikácie, ktorej neplatnosť chceme ukázať, t.j. na výrok $(\forall x)P(x) \Rightarrow (\forall x)Q(x)$. Tento výrok platí, lebo ľavá strana implikácie, t.j. $(\forall x)(x > 2)$, je nepravdivá. (Tvrdenie $x > 2$ neplatí pre všetky reálne čísla.)

Teraz sa pozrime na výrok $(\forall x)(P(x) \Rightarrow Q(x))$, t.j. $(\forall x)(x > 2 \Rightarrow x > 3)$. Tento výrok je nepravdivý. Implikácia $(x > 2 \Rightarrow x > 3)$ neplatí napríklad pre $x = \frac{5}{2}$.

Čiže výrok, o ktorého pravdivosti chceme rozhodnúť, je ekvivalentný s implikáciou $1 \Rightarrow 0$, a teda je nepravdivý.

Viazaný a voľný výskyt premennej O *viazanom výskyte* premennej vo výroku hovoríme v prípade, že sa vyskytuje v kvantifikátore, výskyt bez kvantifikátora nazývame *voľný*. Ukážme si to na jednoduchých príkladoch:

$(\forall x \in \mathbb{R})x^2 \geq 0$ – v tomto výroku je x viazaná premenná,

$x^2 \geq 0$ – tu je x voľnou premennou,

$x = 2 \wedge (\forall x \in \mathbb{R})x^2 \geq 0$ – v tomto výroku sa premenná x vyskytuje dvakrát, prvý výskyt je voľný a druhý viazaný. Znamená to, že prvé x „nie je to isté“ x ako druhé. Preto je výhodnejšie (zrozumiteľnejšie) tento výrok nahradiť ekvivalentným výrokom $x = 2 \wedge (\forall y \in \mathbb{R})y^2 \geq 0$.

Cvičenia

Úloha 2.1.1. Dokážte, že nasledujúce výroky sú tautológie:

- $(\neg p \vee q) \Leftrightarrow (p \Rightarrow q)$
- $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow [(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow p)]$
- $\neg(p \wedge q) \Leftrightarrow (\neg p \vee \neg q)$
- $((p \wedge q) \Rightarrow r) \Leftrightarrow (p \Rightarrow (q \Rightarrow r))$
- $(p \Leftrightarrow q) \Leftrightarrow (\neg p \Leftrightarrow \neg q)$
- $\neg(p \Rightarrow q) \Leftrightarrow (p \wedge \neg q)$
- $(p \Rightarrow \neg q) \Rightarrow \neg p$
- $((p \Rightarrow \neg p) \Rightarrow p) \Rightarrow ((p \Rightarrow \neg p) \Rightarrow \neg p)$
- $[p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)] \Leftrightarrow [p \Leftrightarrow (q \Leftrightarrow r)]$ j) $[p \Rightarrow (q \Rightarrow r)] \Leftrightarrow [p \Rightarrow (q \Rightarrow r)]$

Úloha 2.1.2. Dokážte, že nasledujúce výroky sú tautológie:

- $(p \vee q) \Leftrightarrow (q \vee p)$;
- $(p \wedge q) \Leftrightarrow (q \wedge p)$;
- $p \vee (q \vee r) \Leftrightarrow (p \vee q) \vee r$;
- $p \wedge (q \wedge r) \Leftrightarrow (p \wedge q) \wedge r$;
- $(p \vee p) \Leftrightarrow p$;
- $(p \wedge p) \Leftrightarrow p$;
- $[p \vee (q \wedge r)] \Leftrightarrow [(p \vee q) \wedge (p \vee r)]$;
- $[p \wedge (q \vee r)] \Leftrightarrow [(p \wedge q) \vee (p \wedge r)]$;
- $[p \vee (p \wedge q)] \Leftrightarrow p$;
- $[p \wedge (p \vee q)] \Leftrightarrow p$.

Úloha 2.1.3. Zistite, či uvedené výroky sú tautológie. Svoje tvrdenie zdôvodnite (ak ide o tautológiu, tak to dokážte; ak nie, uveďte kontrapríklad).

- $p \Leftrightarrow \neg \neg p$;
- $\neg p \Leftrightarrow (p \Rightarrow \neg p)$;
- $(p \wedge q) \Rightarrow p$;
- $p \Rightarrow \neg p$;
- $(p \vee q) \Rightarrow p$;
- $(p \Rightarrow q) \Rightarrow (p \Rightarrow (q \wedge r))$;
- $(p \Rightarrow (q \wedge r)) \Rightarrow (p \Rightarrow q)$;
- $\neg p \wedge (p \vee q) \Rightarrow q$;
- $[p \Rightarrow (r \vee \neg q)] \Rightarrow [(p \Rightarrow q) \Rightarrow (p \Rightarrow r)]$
- $[(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow r)] \Rightarrow (p \Rightarrow r)$

Úloha 2.1.4. Ukážte, že operácie $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\Rightarrow$, $\Leftrightarrow$ môžeme definovať pomocou:

- negácie a konjunkcie,
- negácie a disjunkcie,
- negácie a implikácie,

- d) logickej spojky NAND definovanej ako $P \text{ NAND } Q \Leftrightarrow \neg(P \wedge Q)$,
 e) logickej spojky NOR definovanej ako $P \text{ NOR } Q \Leftrightarrow \neg(P \vee Q)$.

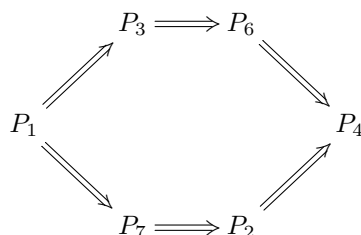
Úloha 2.1.5*. Nech $*$ je logická spojka (=binárna boolovská operácia). Dokážte, že pomocou $*$ môžeme dostať všetkých 16 možných logických spojok **práve vtedy, keď** $*$ je niektorá zo spojok NAND a NOR.

Úloha 2.1.6. Rozhodnite, či sú uvedené výroky pravdivé. Svoje tvrdenie zdôvodnite.

- $[(\forall x)P(x) \Rightarrow (\forall x)Q(x)] \Rightarrow (\forall x)(P(x) \Rightarrow Q(x))$
- $(\exists x)(P(x) \wedge Q(x)) \Leftrightarrow [(\exists x)P(x) \wedge (\exists x)Q(x)]$
- $(\exists x)(P(x) \vee Q(x)) \Leftrightarrow [(\exists x)P(x) \vee (\exists x)Q(x)]$
- $(\forall x)(P(x) \wedge Q(x)) \Leftrightarrow [(\forall x)P(x) \wedge (\forall x)Q(x)]$
- $(\forall x)(P(x) \vee Q(x)) \Leftrightarrow [(\forall x)P(x) \vee (\forall x)Q(x)]$
- $(\forall x)(P(x) \Rightarrow Q(x)) \Leftrightarrow [(\exists x)P(x) \Rightarrow (\exists x)Q(x)]$
- $[(\forall x)(\forall y)(R(x, y) \Rightarrow \neg R(y, x))] \Rightarrow (\forall x)\neg R(x, x)$

Úloha 2.1.7. Pre výrokovú funkciu $P(x, y)$ uvažujme výroky $P_1(x, y) = (\forall x)(\forall y)P(x, y)$, $P_2 = (\forall x)(\exists y)P(x, y)$, $P_3 = (\exists x)(\forall y)P(x, y)$, $P_4 = (\exists x)(\exists y)P(x, y)$, $P_5 = (\forall y)(\forall x)P(x, y)$, $P_6 = (\forall y)(\exists x)P(x, y)$, $P_7 = (\exists y)(\forall x)P(x, y)$, $P_8 = (\exists y)(\exists x)P(x, y)$.

- a) Ukážte, že pre tieto výroky platí: $P_1 \Leftrightarrow P_5$, $P_4 \Leftrightarrow P_8$ a



- b) Ukážte na príklade, že implikácie v predchádzajúcom diagrame nemožno nahradiť ekvivalenciami.
 c) Ukážte na príklade, že nemusia platiť implikácie $P_3 \Rightarrow P_2$ a $P_7 \Rightarrow P_6$.
 Toto cvičenie sa dá stručne zhrnúť tak, že všetky vzťahy medzi výrokmi $P_2, \dots, P_7$ sú tie, ktoré sú naznačené v uvedenom diagrame.

Úloha 2.1.8. Nech p je výrok a $Q(x)$ je výrovková funkcia. Overte, či platia ekvivalencie:

- $p \wedge (\exists x)Q(x) \Leftrightarrow (\exists x)(p \wedge Q(x))$;
- $p \vee (\exists x)Q(x) \Leftrightarrow (\exists x)(p \vee Q(x))$;
- $p \wedge (\forall x)Q(x) \Leftrightarrow (\forall x)(p \wedge Q(x))$;
- $p \vee (\forall x)Q(x) \Leftrightarrow (\forall x)(p \vee Q(x))$.

Úloha 2.1.9. Znegujte nasledujúce výroky. Sú tieto výroky (alebo ich negácie) pravdivé, ak výrovkové premenné berieme z $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q}$, $\mathbb{R}$, $\mathbb{C}$ (s obvyklým sčítaním, násobením, usporiadaním)?

- $(\forall x, y)(x^2 = y^2 \Rightarrow x = y)$;
- $(\forall x)(\exists y)(x^2 = y)$;
- $(\forall x)(\exists y)(x^3 = y)$;
- $(\forall x, y)(\exists z)(x + y = z)$;
- $(\exists x)x^2 \neq 0$;
- $(\forall x)x^2 < 0$;
- $(\forall x)x^2 \leq x$.

2.2 Operácie s množinami

V tejto časti sa budeme venovať niektorým operáciám s množinami a ukážeme si tvrdenia, ktoré o nich platia. Tieto výsledky majú veľmi jednoduché a názorné dôkazy, preto sa od vás očakáva, že takéto tvrdenia budete schopní samostatne dokazovať a ba dokonca aj na ne prísť, keď ich budete potrebovať použiť.

Asi najdôležitejšia vlastnosť, ktorú budeme používať, je to, že dve množiny sa rovnajú práve vtedy, ak majú rovnaké prvky. Inak povedané, množina je jednoznačne určená svojimi prvkami.

Definícia 2.2.1. Hovoríme, že množiny A a B sa rovnajú ak $x \in A$ platí práve vtedy, keď $x \in B$.

$$A = B \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\forall z)(z \in A \Leftrightarrow z \in B)$$

Dalo by sa povedať, že definícia rovnosti množín bude nahrádzať to, že pojem množiny vlastne nemáme úplne presne definovaný.

Začnime tým, že zdefinujeme vzťah „byť podmnožinou“, ktorý sa zvykne nazývať aj *inklúziou*.

Definícia 2.2.2. Ak A , B sú množiny, tak hovoríme, že A je *podmnožinou* B , ak každý prvok množiny A je prvkom množiny B . Tento fakt označíme $A \subseteq B$.

$$A \subseteq B \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} (\forall z)(z \in A \Rightarrow z \in B)$$

Často budeme potrebovať aj označenie pre množinu, ktorá obsahuje všetky podmnožiny danej množiny.

Definícia 2.2.3. Množinu všetkých podmnožín množiny A nazývame *potenčná množina* množiny A a označujeme $\mathcal{P}(A)$.

$$\mathcal{P}(A) = \{B; B \subseteq A\}$$

Nasledujúce tvrdenie zhŕňa základné vlastnosti inklúzie.

Tvrdenie 2.2.4. *Nech A , B , C sú ľubovoľné množiny. Potom platí:*

- (i) *Pre každú množinu platí $A \subseteq A$.*
- (ii) *$A = B$ práve vtedy, keď $A \subseteq B \wedge B \subseteq A$.*
- (iii) *Ak platí $A \subseteq B$ a $B \subseteq C$, tak $A \subseteq C$.*

Dôkaz. (i) Uvedené tvrdenie je ekvivalentné s platnosťou implikácie $x \in A \Rightarrow x \in A$ pre ľubovoľné x . Pravdivosť tejto implikácie vyplýva z tautológie $r \Rightarrow r$ ak v nej za výrok r dosadíme $x \in A$.

(ii) Vyplýva priamo z definície podmnožiny (s použitím definície 2.2.1 a tautológie z úlohy 2.1.1b)).

(iii) Stačí použiť tautológiu $(p \Rightarrow q) \wedge (q \Rightarrow r) \Rightarrow (p \Rightarrow r)$. □

Tvrdenie 2.2.4(ii) niekedy budeme používať na dôkaz rovnosti množín – môžeme dokazovať to, že množiny A a B sa rovnajú tak, že zvlášť dokážeme inklúzie $A \subseteq B$ a $B \subseteq A$.

Definícia 2.2.5. Ak A je podmnožina B a súčasne $A \neq B$, tak hovoríme, že A je *vlastná podmnožina* množiny B . Označenie $A \subsetneq B$.

$$A \subsetneq B \Leftrightarrow (A \subseteq B) \wedge (A \neq B)$$

Poznámka 2.2.6. V tomto texte používam $\subseteq$ na označenie podmnožiny a $\subsetneq$ na označenie vlastnej podmnožiny. Toto označenie som zvolil z toho dôvodu, že som sa chcel vyhnúť možným nedorozumeniam. Dost často sa na označenie inklúzie používa $\subset$, nájdu sa však aj texty (hoci zriedkavejšie), v ktorých $\subseteq$ je symbolom pre podmnožinu, zatiaľčo $\subset$ označuje vlastnú podmnožinu.

Teraz budeme pokračovať tým, že zdefinujeme viaceré operácie s množinami a pozrieme sa na ich základné vlastnosti.

Začnime so zjednotením a prienikom dvojice množín.

Definícia 2.2.7. Nech A, B sú ľubovoľné množiny.

Potom množiny do ktorej patria práve prvky patriace do množiny A alebo do množiny B označujeme $A \cup B$ a nazývame *zjednotenie množín A a B* .

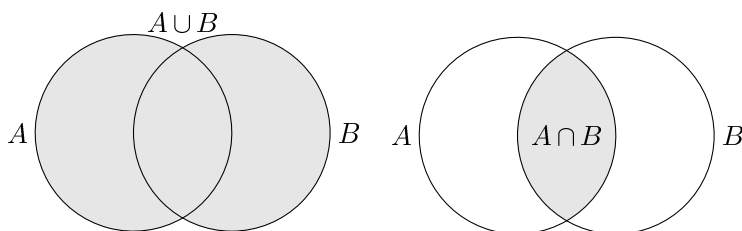
Množinu ktorá obsahuje práve prvky patriace súčasne do A aj do B , nazývame *prienik množín A a B* a označujeme ju $A \cap B$.

Stručne môžeme definíciu prieniku a zjednotenia dvoch množín zapísať ako:

$$A \cup B = \{x; x \in A \vee x \in B\}$$

$$A \cap B = \{x \in A; x \in B\}$$

Tieto operácie sú znázornené na obrázku 2.1 pomocou Vennových diagramov. (Vennovým diagramom sa ešte budeme podrobnejšie venovať v časti 2.2.)



Obr. 2.1: Zjednotenie a prienik dvoch množín

Na tomto mieste si môžeme pripomenúť, že pre konečné množiny ste sa na diskkrétnej matematike naučili vypočítať počet prvkov zjednotenia dvoch množín:

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

(Podobné vzťahy pre viac ako dve množiny viete takisto odvodiť použitím princípu zapojenia a vypojenia.)

Na príklade týchto dvoch operácií si ukážeme, ako môžeme dokazovať rôzne množinové identity. (Keďže však ide o jednoduché dôkazy, ktoré sa dajú ľahko previesť na overovanie tautológií, väčšinu z nich ponecháme ako cvičenie.)

Tvrdenie 2.2.8. Nech A, B, C sú množiny. Potom platí:

- (i) $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$, $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$ (*asociatívnosť operácií $\cup$ a $\cap$*);
- (ii) $A \cup B = B \cup A$, $A \cap B = B \cap A$ (*komutatívnosť operácií $\cup$ a $\cap$*);
- (iii) $\emptyset \cup A = A$, $\emptyset \cap A = \emptyset$;
- (iv) $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$, $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ (*distributívnosť*);

- (v) $A \cap A = A$, $A \cup A = A$ (*idempotentnosť operácií* $\cup$ a $\cap$)
 (vi) $A \cap (A \cup B) = A$, $A \cup (A \cap B) = A$ (*zákon absorpcie*).

Dôkaz. (i) Dve množiny sa rovnajú práve vtedy, keď obsahujú rovnaké prvky. Teda nám stačí ukázať, že platí

$$x \in A \cup (B \cup C) \quad \Leftrightarrow \quad x \in (A \cup B) \cup C.$$

Priamo na základe definície zjednotenia môžeme výrok $x \in A \cup (B \cup C)$ prepísať ako $(x \in A) \vee [(x \in B) \vee (x \in C)]$. Podobne výrok na pravej strane ekvivalencie je ekvivalentný s výrokom $[(x \in A) \vee (x \in B)] \vee (x \in C)$. Ak si teda označíme $p := (x \in A)$, $q := (x \in B)$ a $r := (x \in C)$, tak vlastne máme dokázať

$$p \vee (q \vee r) \quad \Leftrightarrow \quad (p \vee q) \vee r,$$

čo je presne tautológia z úlohy 2.1.2a).

Veľmi podobným spôsobom sa dá druhá časť tohoto tvrdenia previesť na tautológiu 2.1.2b). $\square$

V predchádzajúcom dôkaze sme videli jeden možný spôsob dôkazu množinových identít – založený na tom, že dokazovanú identitu prevedieme na tautológiu, ktorú potom overujeme. Inou možnosťou je dôkaz spočívajúci v algebraickej manipulácii – pokiaľ máme už dokázaný dostatočne veľa identít, môžeme ich použiť na dôkaz nových identít; takýto postup si ukážeme napríklad v príklade 2.2.13. V závere tejto podkapitoly sa budeme ešte venovať metóde dôkazu množinových identít pomocou Vennových diagramov.

Niekedy budeme potrebovať urobiť prienik nie len jednej množiny, ale celého systému množín.

Definícia 2.2.9. Ak $\mathcal{S}$ je nejaký systém množín, tak množinu

$$\bigcup \mathcal{S} = \{x; (\exists S \in \mathcal{S}) x \in S\}$$

nazývame *zjednotením systému množín* $\mathcal{S}$.

Budeme používať aj prienik systému množín – pre *neprázdny* systém $\mathcal{S} = \{A_i; i \in I\}$ zavedieme označenia:

$$\bigcap \mathcal{S} = \bigcap_{A \in \mathcal{S}} A := \{z; (\forall A \in \mathcal{S}) z \in A\}$$

$$\bigcap_{i \in I} A_i := \{z; (\forall i \in I) z \in A_i\}$$

Dôvod, prečo pri prieniku systému množín vyžadujeme $I \neq \emptyset$ je ten, že pre prázdnu množinu by sme takto dostali množinu všetkých množín resp. všetkých objektov – ako sme už videli pri Russellovom paradoxe, takýto objekt vedie k možným problémom.

Na dôkaz rôznych identít platných pre prienik a zjednotenie systému množín môžeme použiť podobný prístup ako pre prienik a zjednotenie dvoch množín, ibaže namiesto tautológií v tomto prípade dostaneme výroky s kvantifikátormi, ktorých platnosť bude treba overiť.

Nasledujúce tvrdenie hovorí, že distributívnosť platí aj pre prienik a zjednotenie systému množín:

Tvrdenie 2.2.10. *Nech $\mathcal{S}$ a B sú ľubovoľné množiny. Potom platí:*

- (i) $B \cap \bigcup_{A \in \mathcal{S}} A = \bigcup_{A \in \mathcal{S}} (B \cap A)$;
 (ii) $B \cup \bigcap_{A \in \mathcal{S}} A = \bigcap_{A \in \mathcal{S}} (B \cup A)$.

Dôkaz. Opäť ukážeme iba prvú časť tvrdenia, druhú identitu ponechávame ako cvičenie.

Pokúsme sa (podľa definície) prepísať, čo to znamená, že prvok x patrí do množiny uvedenej na ľavej strane dokazovanej rovnosti. Použitím definície prieniku dvoch množín a prieniku systému množín dostaneme, že

$$x \in B \cap \bigcup_{A \in \mathcal{S}} A \Leftrightarrow (x \in B) \wedge (\exists A \in \mathcal{S}) x \in A.$$

Pre množinu na pravej strane rovnosti dostávame

$$x \in \bigcup_{A \in \mathcal{S}} (B \cap A) \Leftrightarrow (\exists A \in \mathcal{S}) (x \in B \wedge x \in A).$$

Ak označíme $p := (x \in B)$ a $Q(A) := x \in A$, tak vlastne máme overiť ekvivalenciu

$$p \wedge (\exists A \in \mathcal{S}) Q(A) \Leftrightarrow (\exists A \in \mathcal{S}) p \wedge Q(A).$$

To je presne ekvivalencia z úlohy 2.1.8a). □

Dokážeme aj niektoré vzťahy medzi množinovými operáciami a reláciou inklúzie.

Tvrdenie 2.2.11. *Nech A a B sú množiny. Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:*

- (i) $A \subseteq B$;
- (ii) $A = A \cap B$;
- (iii) $B = A \cup B$.

Dôkaz. (i) $\Rightarrow$ (ii): Podmienka $A \subseteq B$ znamená platnosť implikácie $(x \in A) \Rightarrow (x \in B)$ pre ľubovoľné x .

Ak $x \in A$, tak na základe tejto implikácie platí aj $x \in B$, čiže platí $(x \in A) \wedge (x \in B)$, t.j. $x \in A \cap B$. Tým je dokázaná inklúzia $A \subseteq A \cap B$.

Obrátene, z $x \in A \cap B$, t.j. $(x \in A) \wedge (x \in B)$ vyplýva $x \in A$. (Tu dokonca nepotrebujeme podmienku $A \subseteq B$. Používame vlastne tautológiu $p \Rightarrow (p \wedge q)$.) Teda platí aj inklúzia $A \cap B \subseteq A$.

Spojením týchto dvoch inklúzií dostávame rovnosť $A = A \cap B$.

Dôkaz implikácie (i) $\Rightarrow$ (iii) je veľmi podobný ako dôkaz predchádzajúcej časti, ponechávame ho ako cvičenie.

(ii) $\Rightarrow$ (i): Predpokladajme, že platí $A = A \cap B$. Ak $x \in A$, tak potom $x \in A \cap B$, čo znamená, že $(x \in A) \wedge (x \in B)$. Teda x patrí aj do množiny B . Tým je ukázaná inklúzia $A \subseteq B$.

Dôkaz implikácie (iii) $\Rightarrow$ (i) opäť prenecháme čitateľovi. □

Tvrdenie 2.2.12. *Nech A, B, C sú množiny. Potom platí:*

- (i) $\emptyset \subseteq A$;
- (ii) $A \cap B \subseteq A \subseteq A \cup B$;
- (iii) Ak $A \subseteq B$, tak $A \cap C \subseteq B \cap C$ a $A \cup C \subseteq B \cup C$.

Dôkaz. (i): Množina $\emptyset$ neobsahuje žiadny prvok, teda každý prvok z $\emptyset$ patrí aj do A .

(ii): Platí $x \in A \cap B \Leftrightarrow [(x \in A) \wedge (x \in B)] \Rightarrow x \in A$. Tým je dokázaná inklúzia $A \cap B \subseteq A$.

Podobne z $x \in A$ vyplýva $(x \in A) \vee (x \in B) \Leftrightarrow x \in A \cup B$, a teda platí $A \subseteq A \cup B$.

(iii): Predpokladáme, že $A \subseteq B$, čiže platí implikácia $(x \in A) \Rightarrow (x \in B)$. Potom platí aj $[(x \in A) \wedge (x \in C)] \Rightarrow [(x \in B) \wedge (x \in C)]$ (na základe tautológie $(p \Rightarrow q) \Rightarrow [(p \wedge r) \Rightarrow (q \wedge r)]$);

čo je len inak zapísaná implikácia $x \in A \cap C \Rightarrow x \in B \cap C$. Dôkaz druhej časti sa dá urobiť úplne analogicky.

Skúsme ešte urobiť dôkaz druhej časti pomocou tvrdenia 2.2.11. (Touto metódou by sa samozrejme dala dokazovať aj prvá časť tvrdenia.) Vieme teda, že platí $B = A \cup B$ a radi by sme pomocou toho dokázali $(A \cup C) \cup (B \cup C) = B \cup C$. Z tvrdenia 2.2.8 vieme, že operácia $\cup$ je asociatívna (výrazy obsahujúce len túto operáciu môžeme ľubovoľne prezátvorkovať), komutatívna (množiny môžeme vymieňať) a idempotentná. Pomocou týchto vlastností skutočne dostaneme

$$(A \cup C) \cup (B \cup C) = [A \cup (C \cup C)] \cup B = (A \cup C) \cup B = (A \cup B) \cup C = B \cup C.$$

□

Ako príklad použitia predchádzajúcich tvrdení uvidíme iný dôkaz tvrdenia 2.2.8(vi).

Príklad 2.2.13. $A \cap (A \cup B) \stackrel{(1)}{=} (A \cap A) \cup (A \cap B) \stackrel{(2)}{=} A \cup (A \cap B) \stackrel{(3)}{=} A$, pričom v jednotlivých rovnostiach sme použili:

- (1) distributívnosť – tvrdenie 2.2.8(iv)
- (2) idempotentnosť – tvrdenie 2.2.8(v)
- (3) fakt, že $A \cap B \subseteq A$ – tvrdenie 2.2.12(ii) – a tvrdenie 2.2.11 pre množiny $A \cap B$ a A .

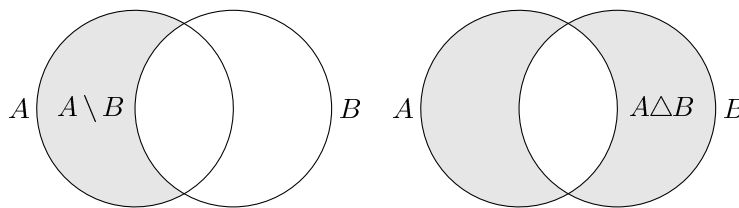
Ďalšie operácie, ktoré budeme niekedy používať, sú rozdiel a symetrická diferencia (symetrický rozdiel) dvoch množín.

Definícia 2.2.14. Rozdiel množín A a B je množina

$$A \setminus B := \{x \in A; x \notin B\}.$$

Symetrická diferencia množín A a B je množina

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



Obr. 2.2: Vennove diagramy pre $A \setminus B$ a $A \Delta B$

Symetrický rozdiel je teda množina tých prvkov, ktoré patria práve do jednej z množín A , B . Zodpovedá logickej spojke XOR.

Tvrdenie 2.2.15. Nech A , B , C sú množiny. Potom platí:

- (i) $A \setminus (B \cap C) = (A \setminus B) \cup (A \setminus C)$, $A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \cap (A \setminus C)$;
- (ii) $A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \setminus C$;
- (iii) $A \setminus (B \setminus C) = (A \setminus B) \cup (A \cap C)$;
- (iv) $(A \cup B) \setminus C = (A \setminus C) \cup (B \setminus C)$, $(A \cap B) \setminus C = (A \setminus C) \cap (B \setminus C)$;

- (v) $A \setminus B = A \setminus (A \cap B)$;
- (vi) $(A \setminus B) \cap C = (A \cap C) \setminus B = A \cap (C \setminus B)$;
- (vii) $(A \setminus B) \cup C = (A \cup C) \setminus (B \setminus C)$;
- (viii) $A \cup B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A) \cup (A \cap B)$;
- (ix) $A \subseteq B \Leftrightarrow A \setminus B = \emptyset$.
- (x) Ak pre každé $i \in I$ je B_i množina, tak platí $A \setminus \bigcap_{i \in I} B_i = \bigcup_{i \in I} (A \setminus B_i)$ a $A \setminus \bigcup_{i \in I} B_i = \bigcap_{i \in I} (A \setminus B_i)$.
- (xi) Ak $B \subseteq C$, tak $A \setminus C \subseteq A \setminus B$.
- (xii) Ak $B \subseteq C$, tak $B \setminus A \subseteq C \setminus A$.

Časti (i) a (x) sa zvyknú nazývať *de Morganove zákony*.

Tvrdenie 2.2.16. *Nech A, B, C sú množiny. Potom platí:*

- (i) $A \triangle B = B \triangle A$;
- (ii) $(A \triangle B) \triangle C = A \triangle (B \triangle C)$;
- (iii) $A \triangle A = \emptyset$, $A \triangle \emptyset = A$;
- (iv) $A \cup B = A \triangle B \triangle (A \cap B)$;
- (v) $A \setminus B = A \triangle (A \cap B)$.

Dôkaz. (ii) Štandardným spôsobom prevedieme uvedené tvrdenie na dôkaz tautológie $(p \text{ XOR } q) \text{ XOR } r \Leftrightarrow p \text{ XOR } (q \text{ XOR } r)$, pričom logická spojka XOR je určená tabuľkou

p	q	$p \text{ XOR } q$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Pri dokazovaní našej tautológie potom dostávame nasledujúcu tabuľku:

p	q	r	$p \text{ XOR } q$	$a := (p \text{ XOR } q) \text{ XOR } r$	$q \text{ XOR } r$	$b := p \text{ XOR } (q \text{ XOR } r)$	$a \Leftrightarrow b$
1	1	1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1

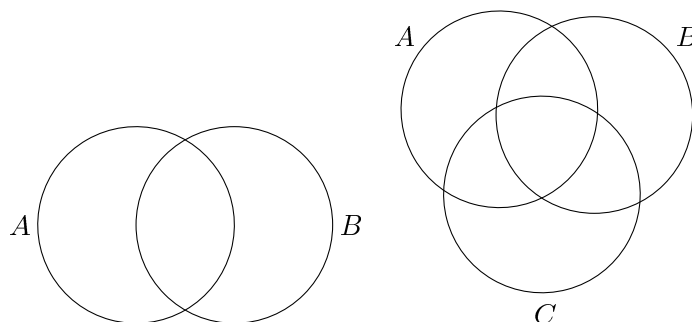
□

Vennove diagramy

Pri dôkazoch množinových identít môžeme použiť aj *Vennove diagramy*. Pri nich znázorníme množiny ako rovinné útvary, pričom dbáme na to, aby množiny boli v tzv. *generickej polohe*, t.j. aby sa tam vyskytli „všetky možné“ oblasti. (Napríklad oblasť predstavujúca prvky patriace do A aj B a nepatriace do C , ak kreslíme Vennov diagram pre 3 množiny.)

Na obrázku 2.3 sú znázornené 2 resp. 3 množiny v generickej polohe. (Môžete sa pokúsiť vymyslieť, ako by ste kreslili Vennove diagramy pre viac množín.)

Pri dôkaze postupujeme tak, že vo Vennovom diagrame nakreslíme postupne, ako vyzerajú množiny na ľavej a pravej strane rovnosti a tieto obrázky porovnáme.



Obr. 2.3: Generická poloha

Príklad 2.2.17. Ako príklad si ukážeme dôkaz asociatívnosti pre operáciu Δ (tvrdenie 2.2.16(ii)). Dôkaz toho istého tvrdenia overením príslušnej tautológie tabuľkovou metódou sme už videli.

Na obrázku 2.4 vidíme, ako môžeme postupovať. Najprv (ako pomôcku) sme si nakreslili oblasť zodpovedajúcu množine $A \Delta B$ a potom, pomocou nej, sme dostali množinu $(A \Delta B) \Delta C$ vystupujúcu na ľavej strane rovnosti.

Analogicky postupujeme pre množinu $A \Delta (B \Delta C)$ na pravej strane rovnosti. Vidíme, že sme dostali presne rovnaké obrázky, čiže rovnosť $(A \Delta B) \Delta C = A \Delta (B \Delta C)$ platí.

Môžete sa pýtať, do akej miery je dôkaz pomocou Vennových diagramov korektný. (Od prvého ročníka na vysokej škole ste už určite veľakrát počuli, že „obrázok nie je dôkaz“.) Odpoveď je, že tento dôkaz je úplne rovnocenný s overením príslušnej tautológie tabuľkovou metódou. Robíme tam totiž presne to isté, čo pri tabuľkovej metóde, len namiesto symbolov 0 a 1 používame farebné zvýraznenie niektorej oblasti – pozri obrázok 2.5. Môžete si teda vybrať ktorúkoľvek z týchto dvoch metód a používať tú, ktorá vám väčšmi vyhovuje a pri ktorej máte menšiu obavu z toho, že by ste spravili chybu.

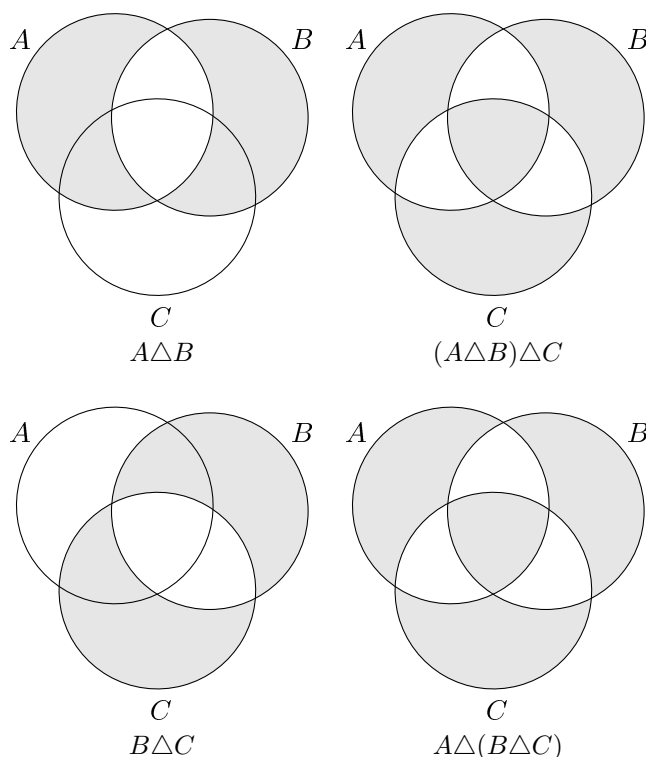
Cvičenia

Úloha 2.2.1. Dokážte tvrdenia 2.2.8, 2.2.11, 2.2.12, 2.2.10, 2.2.15, 2.2.16; resp. tie časti uvedených tvrdení, ktoré sme nedokázali v predchádzajúcom texte. (Vyskúšajte si aspoň na niektorom príklade tabuľkovú metódu aj Vennove diagramy; v prípade tvrdení týkajúcich sa inklúzie si môžete vyskúšať dôkaz priamo z definície ako aj použitie tvrdenia 2.2.11.)

Úloha 2.2.2. Pokúste sa vymyslieť nejaké možné nakreslenia Vennovho diagramu pre 4 (prípadne aj viac) množín.

Úloha 2.2.3. Zistite, či sú uvedené tvrdenia pravdivé (pre ľubovoľný výrok $P(x)$). V prípade nepravdivých tvrdení rozhodnite, či aspoň jedna z implikácií je pravdivá. Svoje tvrdenie zdôvodnite!

- a) $[(\exists x \in A)P(x) \vee (\exists x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\exists x \in A \cup B)P(x)$
- b) $[(\forall x \in A)P(x) \vee (\forall x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\forall x \in A \cup B)P(x)$
- c) $[(\forall x \in A)P(x) \wedge (\forall x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\forall x \in A \cup B)P(x)$
- e) $[(\exists x \in A)P(x) \wedge (\exists x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\exists x \in A \cap B)P(x)$
- f) $[(\forall x \in A)P(x) \vee (\forall x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\forall x \in A \cap B)P(x)$
- g) $[(\forall x \in A)P(x) \wedge (\forall x \in B)P(x)] \Leftrightarrow (\forall x \in A \cap B)P(x)$.

Obr. 2.4: Asociativnosť operácie Δ

Úloha 2.2.4. Rozhodnite, či sú nasledujúce tvrdenia pravdivé pre ľubovoľné množiny A , B , C . Tvrdenie dokažte alebo nájdite kontrapríklad.

a) $A \setminus (B \setminus C) = (A \setminus B) \setminus C$

Úloha 2.2.5. Dokážte platnosť daného tvrdenia pre ľubovoľné množiny A , B , C , alebo nájdite kontrapríklad:

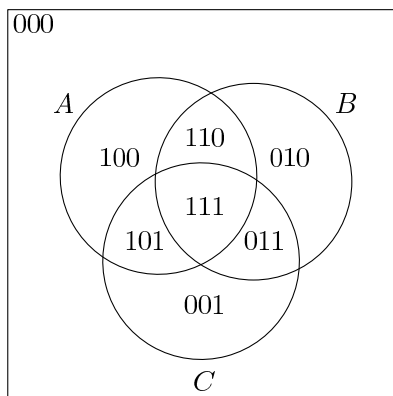
- a) $A \subseteq B \cap C$ práve vtedy, keď $A \subseteq B$ a $A \subseteq C$;
- b) $A \subseteq B \cup C$ práve vtedy, keď $A \subseteq B$ alebo $A \subseteq C$;
- c) $A \cup B \subseteq C$ práve vtedy, keď $A \subseteq C$ a $B \subseteq C$;
- d) $A \cap B \subseteq C$ práve vtedy, keď $A \subseteq C$ alebo $B \subseteq C$.

Úloha 2.2.6. Nech $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{S}'$. Dokážte, že $\bigcup \mathcal{S} \subseteq \bigcup \mathcal{S}'$. Ak navyše predpokladáme $\mathcal{S} \neq \emptyset$, tak $\bigcap \mathcal{S} \supseteq \bigcap \mathcal{S}'$.

2.3 Usporiadané dvojice a karteziánsky súčin

V ďalšom budeme potrebovať pojem karteziánskeho súčinu množín, ktorý je definovaný pomocou usporiadaných dvojíc.

Ak zoberieme dva prvky x a y , tak množinu obsahujúcu práve tieto dva prvky môžeme zapísať viacerými spôsobmi: $\{x, y\} = \{y, x\} = \{x, x, y\}$. Inak povedané, pri množinách nezáleží na poradí v akom uvedieme prvky množiny. (A takisto ani na tom, či ich spomenieme viackrát.)



Obr. 2.5: Vzťah medzi Vennovým diagramom a tabuľkou

Teraz sa nám bude hodiť pojem usporiadanej dvojice – t.j. tiež budeme pracovať s dvoma prvkami, ale bude nám záležať i na poradí.

Definícia 2.3.1. *Usporiadanú dvojicu* pozostávajúcu z prvkov a, b budeme označovať (a, b) . Dve usporiadané dvojice budeme považovať za rovnaké, ak sa zhodujú ich prvé aj druhé súradnice, t.j.,

$$(a, b) = (c, d) \quad \Leftrightarrow \quad a = c \wedge b = d.$$

Opäť sa dá povedať, že sme vlastne neuviedli poriadnu definíciu usporiadanej dvojice – jediné, čo však je pre nás podstatné je to, že vieme povedať, kedy sa dve usporiadané dvojice rovnajú. (Podobne sme to urobili pre rovnosť množín v definícii 2.2.1.)

Je zrejmé, že uvedená definícia sa dá veľmi ľahko rozšíriť pre konečný počet množín.

Pomocou pojmu usporiadanej dvojice môžeme zdefinovať karteziánsky súčin dvoch množín.

Definícia 2.3.2. Karteziánsky súčin množín A a B je množina, ktorej prvkami sú práve také usporiadané dvojice, kde prvý prvok patrí do množiny A a druhý prvok patrí do množiny B . Túto množinu označujeme

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

Uvedieme niektoré základné vlastnosti karteziánskeho súčinu. Opäť, ako obvykle, dôkazy viacerých z nich ponecháme ako cvičenie.

Tvrdenie 2.3.3. *Nech A, B, C, D sú množiny. Potom platí*

- (i) $A \times \emptyset = \emptyset \times A = \emptyset$;
- (ii) $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$;
- (iii) $A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$;
- (iv) $A \times (B \setminus C) = (A \times B) \setminus (A \times C)$.
- (v) *Ak navyše predpokladáme, že A, B, C, D sú neprázdne, tak $A \times B = C \times D$ platí práve vtedy, keď $A = C$ a $B = D$.*

Dôkaz. Ukážeme druhú a piatu časť tvrdenia – ostatné zostanú ako cvičenie pre čitateľa.

(ii): Prvok x patrí do množiny $A \times (B \cup C)$ práve vtedy, keď $x = (a, d)$ pre nejaké $a \in A$ a $d \in B \cup C$. To znamená, že $d \in B$ alebo $d \in C$. Teda dostávame, že $x \in A \times (B \cup C)$ práve vtedy, keď $x = (a, d)$ pre nejaké $a \in A$ a $d \in B$ alebo $x = (a, d)$ pre nejaké $a \in A$ a $d \in C$. Posledná časť je ale len iný zápis toho, že $x \in (A \times B) \cup (A \times C)$.

(v): Predpokladajme, že $A \neq \emptyset$. Teda existuje nejaký prvok $a \in A$. Potom pre každý prvok $b \in B$ platí $(a, b) \in A \times B = C \times D$. Z toho, že $(a, b) \in C \times D$ už vyplýva, že $b \in D$. Dokázali sme teda inklúziu $B \subseteq D$.

Inklúzia $D \subseteq B$ sa dokáže podobne, s využitím toho, že $C \neq \emptyset$. Tým je dokázané $B = D$. Rovnosť $A = C$ možno zdôvodniť analogicky. $\square$

Cvičenia

Úloha 2.3.1. Dokážte ostatné časti tvrdenia 2.3.3.

Úloha 2.3.2. Dokážte (priamo, nie s použitím tvrdenia 2.3.3):

- a) Pre $A, B \neq \emptyset$ platí $A \times B = B \times A \Rightarrow A = B$;
- b) $A \times B = \emptyset \Leftrightarrow A = \emptyset \vee B = \emptyset$.

Úloha 2.3.3. Dokážte, že pre $A \neq \emptyset$ platí $A \times B \subseteq A \times C \Leftrightarrow B \subseteq C$. Platí toto tvrdenie bez predpokladu $A \neq \emptyset$?

Úloha 2.3.4. Dokážte, alebo nájdite kontrapríklad:

- a) $(A \times B) \cup (C \times D) \subseteq (A \cup C) \times (B \cup D)$;
- b) $(A \times B) \cup (C \times D) \supseteq (A \cup C) \times (B \cup D)$;
- c) $(A \times B) \cup (C \times D) = (A \cup C) \times (B \cup D)$;
- d) $(A \times B) \cap (C \times D) \subseteq (A \cap C) \times (B \cap D)$;
- e) $(A \times B) \cap (C \times D) \supseteq (A \cap C) \times (B \cap D)$;
- f) $(A \times B) \cap (C \times D) = (A \cap C) \times (B \cap D)$.

Úloha 2.3.5. Dokážte, že množiny A, B sú disjunktné práve vtedy, keď $(A \times B) \cap (B \times A) = \emptyset$.

Úloha 2.3.6. Dokážte, že pre ľubovoľné množiny A, B, C platí $A \times (B \triangle C) = (A \times B) \triangle (A \times C)$.

Úloha 2.3.7. Ukážte, že ak $A \times C \subseteq B \times D$ a $A \times C \neq \emptyset$, tak $A \subseteq B$ a $C \subseteq D$. Ukážte na príklade, že bez predpokladu $A \times C \neq \emptyset$ už toto tvrdenie neplatí.

2.4 Funkcie

Veľmi dôležitú úlohu v niektorých úvahách v ďalších častiach tejto prednášky budú hrať funkcie (alebo tiež zobrazenia, obidva názvy budeme používať ako ekvivalentné). Veľa vecí, ktoré spomenieme v tejto časti, už poznáte z prvého ročníka. Nové by mali byť nanajvýš pojmy vzor a obrazu množiny.

Definícia 2.4.1. Zobrazenie (funkcia) z množiny A do B je podmnožina $f \subseteq A \times B$ karteziánskeho súčinu množín A a B taká, že pre každé $a \in A$ existuje práve jedno $b \in B$ s vlastnosťou $(a, b) \in f$.

$$(\forall a \in A)(\exists! b \in B)(a, b) \in f$$

Zobrazenie f z A do B budeme označovať $f: A \rightarrow B$. Množinu A nazývame *definičný obor* a B *obor hodnôt* zobrazenia f .

Poznámka 2.4.2. Namiesto zápisu $(a, b) \in f$ budeme používať zápis $f(a) = b$, tak ako ste boli zvyknutí aj doteraz. Definícia zobrazenia zaručuje, že tento zápis je zmysluplný, že ide o rovnosť nejakých dvoch objektov, keďže $f(a)$ predstavuje práve jeden prvok z množiny B .

Niekedy budeme používať aj zápis $f: a \mapsto b$.

Príklad 2.4.3. Jednoduchým príkladom zobrazenia je zobrazenie $id_A: A \rightarrow A$ definovaná tak, že pre každé $a \in A$ platí

$$id_A(a) = a.$$

Toto zobrazenie zvykneme nazývať *identické zobrazenie*.

Definícia 2.4.4. Ak $f: A \rightarrow B$ je zobrazenie a $C \subseteq A$, tak zobrazenie $f|_C: C \rightarrow B$, definované predpisom

$$f|_C(x) = f(x)$$

pre všetky $x \in C$, nazývame *zúženie zobrazenia f na množinu C* .

Množinovo môžeme definíciu zúženia zobrazenia zapísať ako

$$f|_C = f \cap (C \times B).$$

Pripomeňme tiež definíciu skladania zobrazení.

Definícia 2.4.5. Ak $f: A \rightarrow B$ a $g: B \rightarrow C$ sú zobrazenia, tak zložené zobrazenie $g \circ f: A \rightarrow C$ definujeme ako zobrazenie určené predpisom:

$$g \circ f(a) = g(f(a)) \text{ pre každé } a \in A.$$

Definícia 2.4.6. Nech $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie. Hovoríme, že f je *injektívne (prsté) zobrazenie* (alebo tiež *injekcia*), ak pre všetky $x, y \in X$ také, že $x \neq y$, platí $f(x) \neq f(y)$.

Hovoríme, že f je *surjektívne (surjektívne zobrazenie, zobrazenie na)*, ak pre každé $y \in Y$ existuje také, $x \in X$, že $f(x) = y$.

Hovoríme, že f je *bijektívne (bijektívne zobrazenie)*, ak f je súčasne injektívne aj surjektívne.

Definíciu injektívne môžeme ekvivalentne prepísať ako $f(x) = f(y) \Rightarrow x = y$. Teda zobrazenie je injektívne práve vtedy, keď sa na žiadny prvok oboru hodnôt nezobrazí viac ako jeden prvok definičného oboru. Zobrazenie je surjektívne, ak každý prvok oboru hodnôt má nejaký vzor – prvok, ktorý sa naň zobrazí.

Niektoré základné vlastnosti injekcií, surjekcií a bijekcií sú zhrnuté v cvičeniach za touto podkapitolou. (Mnohé z nich by ste mali ovládať z prvého ročníka, prínajmenšom celkom určite tie, ktoré sú uvedené v úlohe 2.4.1.)

Definícia 2.4.7. Nech $f: A \rightarrow B$ je zobrazenie. Ak existuje zobrazenie $g: B \rightarrow A$ také, že

$$g \circ f = id_A$$

$$f \circ g = id_B$$

tak hovoríme, že g je *inverzné zobrazenie* k zobrazeniu f a označujeme ho f^{-1} .

Definícia inverzného zobrazenia vlastne hovorí, že:

$$(\forall a \in A) g(f(a)) = a$$

$$(\forall b \in B) f(g(b)) = b$$

Môžeme si tiež uvedomiť, že pre inverzné zobrazenie platí

$$f^{-1}(b) = a \quad \Leftrightarrow \quad f(a) = b.$$

Teda vlastne je to predpis, ktorý „obracia“ pôvodné zobrazenie „naopak“.

Z prvého ročníka viete, že podmienkami z definície je inverzné zobrazenie určené jednoznačne. Okrem toho bude pre nás dôležité aj nasledujúce tvrdenie, ktoré hovorí, za akých predpokladov sa k f dá urobiť inverzné zobrazenie:

Tvrdenie 2.4.8. *Nech $f: A \rightarrow B$ je zobrazenie. Potom inverzné zobrazenie $f^{-1}: B \rightarrow A$ existuje práve vtedy, keď f je bijekcia.*

Definícia 2.4.9. Nech $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie, $A \subseteq X$, $B \subseteq Y$.

Potom množinu

$$f[A] := \{f(a); a \in A\}$$

nazývame *obraz množiny A v zobrazení f* a množinu

$$f^{-1}[B] = \{a \in X; f(a) \in B\}$$

nazývame *vzor množiny B v zobrazení f* .

V prípade, že $B = \{b\}$ je jednoprvková množina, niekedy namiesto zápisu $f^{-1}[\{b\}]$ použijeme zápis $f^{-1}(b)$. (Z kontextu by malo byť zrejmé, či hovoríme o inverznej funkcii k f , alebo zápis $f^{-1}(b)$ znamená vzor jednoprvkovej množiny.)

To znamená, že vzor a obraz množiny sú charakterizované týmito podmienkami:

$$\begin{aligned} y \in f[A] &\Leftrightarrow (\exists a \in A) y = f(a) \\ x \in f^{-1}[B] &\Leftrightarrow f(x) \in B \end{aligned}$$

Uvedieme základné vlastnosti vzoru a obrazu množín, niektoré z nich dokážeme, väčšinu ale ponecháme ako cvičenie.

Tvrdenie 2.4.10. *Nech $f: X \rightarrow Y$, $g: Y \rightarrow Z$ sú zobrazenia, $A, B \subseteq X$, $C, D \subseteq Y$, $E \subseteq Z$, $A_i \subseteq X$ a $B_i \subseteq Y$ pre každé $i \in I$. Potom platí*

- (i) $g \circ f[A] = g[f[A]]$;
- (ii) $(g \circ f)^{-1}[E] = f^{-1}[g^{-1}[E]]$;
- (iii) $A \subseteq f^{-1}[f[A]]$ a ak f je injektívne, tak $A = f^{-1}[f[A]]$;
- (iv) $f[f^{-1}[C]] \subseteq C$ a ak f je surjektívne, tak $f[f^{-1}[C]] = C$;
- (v) $f[A \cap B] \subseteq f[A] \cap f[B]$ a ak f je injektívne, tak $f[A \cap B] = f[A] \cap f[B]$;
- (vi) $f[\bigcap_{i \in I} A_i] \subseteq \bigcap_{i \in I} f[A_i]$ a ak f je injektívne, tak $f[\bigcap_{i \in I} A_i] = \bigcap_{i \in I} f[A_i]$;
- (vii) $f[A \cup B] = f[A] \cup f[B]$;
- (viii) $f[\bigcup_{i \in I} A_i] = \bigcup_{i \in I} f[A_i]$;
- (ix) $f^{-1}[C \cap D] = f^{-1}[C] \cap f^{-1}[D]$;
- (x) $f^{-1}[\bigcap_{i \in I} B_i] = \bigcap_{i \in I} f^{-1}[B_i]$;
- (xi) $f^{-1}[C \cup D] = f^{-1}[C] \cup f^{-1}[D]$;
- (xii) $f^{-1}[\bigcup_{i \in I} B_i] = \bigcup_{i \in I} f^{-1}[B_i]$;
- (xiii) $A \subseteq B \Rightarrow f[A] \subseteq f[B]$ a ak f je injekcia, tak platí aj opačná implikácia;
- (xiv) $C \subseteq D \Rightarrow f^{-1}[C] \subseteq f^{-1}[D]$ a ak f je surjekcia, tak platí aj opačná implikácia;
- (xv) $f[A] \subseteq C \Leftrightarrow A \subseteq f^{-1}[C]$.

Dôkaz. (v) Ak $x \in f[A \cap B]$, znamená to, že $x = f(c)$ pre nejaké $c \in A \cap B$. Potom ale $c \in A$ a súčasne aj $c \in B$. Z toho vyplýva, že $x = f(c)$ súčasne patrí do $f[A]$ aj $f[B]$, čiže patrí aj do prieniku $f[A] \cap f[B]$, čím je dokázaná inklúzia $f[A \cap B] \subseteq f[A] \cap f[B]$.

Predpokladajme navyše, že f je injekcia a pokúsme sa za tohoto predpokladu dokázať aj opačnú inklúziu. Ak $x \in f[A] \cap f[B]$, tak $x = f(a)$ pre nejaké $a \in A$ a súčasne $x = f(b)$ pre nejaké $b \in B$. Z rovnosti $x = f(a) = f(b)$ dostaneme, na základe injektívnosti f , že platí $a = b$. Teda prvok a patrí do $A \cap B$ a $x = f(a)$ je prvkom množiny $f[A \cap B]$. Tým sme dokázali inklúziu $f[A] \cap f[B] \subseteq f[A \cap B]$. Spolu s prvou časťou dôkazu máme už dokázané obe inklúzie medzi týmito množinami, a teda platí rovnosť.

(x) Nech $x \in f^{-1}[\bigcap_{i \in I} A_i]$, čiže $f(x) \in \bigcap_{i \in I} A_i$. To je ekvivalentné s podmienkou, že $(\forall i \in I) f(x) \in A_i$. Túto podmienku môžeme ďalej ekvivalentne prepísať ako $(\forall i \in I) x \in f^{-1}[A_i]$ a tiež $x \in \bigcap_{i \in I} f^{-1}[A_i]$. Teda podmienky $x \in f^{-1}[\bigcap_{i \in I} A_i]$ a $x \in \bigcap_{i \in I} f^{-1}[A_i]$ sú skutočne ekvivalentné.

(xv) $f[A] \subseteq C \Leftrightarrow (\forall a \in A) f(a) \in C \Leftrightarrow (\forall a \in A) a \in f^{-1}[C] \Leftrightarrow A \subseteq f^{-1}[C]$. $\square$

2.4.1 Karteziánsky súčin funkcií

Ďalší pojem, ktorý bude pre nás neskôr užitočný, je karteziánsky súčin funkcií. Podobne ako pri karteziánskom súčine množín, budeme ho definovať zvlášť pre súčin dvoch množín a zvlášť pre súčin systému množín.

Definícia 2.4.11. Nech $f: A \rightarrow C$, $g: B \rightarrow D$ sú zobrazenia. Potom ich *karteziánsky súčin* je zobrazenie $f \times g: A \times B \rightarrow C \times D$ určené predpisom

$$f \times g(a, b) = (f(a), g(b)).$$

Zobrazenie $f \times g$ je vlastne zobrazenie, ktoré sa na prvej súradnici správa rovnako ako f a na druhej súradnici ako g .

Tvrdenie 2.4.12. Nech $f: A \rightarrow C$, $g: B \rightarrow D$ sú zobrazenia.

- (i) Ak f aj g sú injekcie, tak $f \times g$ je injekcia.
- (ii) Ak f aj g sú surjekcie, tak $f \times g$ je surjekcia.
- (iii) Ak f aj g sú bijekcie, tak $f \times g$ je bijekcia.

Dôkaz. (i) Nech f a g sú injekcie. Ak platí $f \times g(a, b) = f \times g(a', b')$, znamená to, že $(f(a), g(b)) = (f(a'), g(b'))$, čiže $f(a) = f(a')$, $g(b) = g(b')$. Z injektívnosti zobrazení f , g potom máme $a = a'$, $b = b'$ a $(a, b) = (a', b')$.

(ii) Nech f , g sú surjekcie a $(c, d) \in C \times D$. Potom existujú $a \in A$ a $b \in B$ tak, že $f(a) = c$, $g(b) = d$. Z toho máme, že $f \times g(a, b) = (c, d)$. Ukázali sme, že pre ľubovoľné (c, d) existuje vzor, a teda zobrazenie $f \times g$ je surjektívne.

(iii) Vyplýva z častí (i) a (ii). $\square$

Cvičenia

Úloha 2.4.1. Dokážte, že:

- a) Zloženie dvoch injekcií je injekcia.
- b) Zloženie dvoch surjekcií je surjekcia.
- c) Zloženie dvoch bijekcií je bijekcia.

Úloha 2.4.2. Nech $f: X \rightarrow Y$, $g, h: Y \rightarrow Z$ sú zobrazenia. Dokážte, že:

- a) Ak f je surjekcia, tak platí $g \circ f = h \circ f \Rightarrow g = h$.
- b) Ak $Z \neq \emptyset$ a platí (pre ľubovoľné $g, h: Y \rightarrow Z$) implikácia $g \circ f = h \circ f \Rightarrow g = h$, tak f je surjekcia.

Úloha 2.4.3. Nech $g, h: X \rightarrow Y$, $f: Y \rightarrow Z$ sú zobrazenia. Dokážte, že:

- a) Ak f je injekcia a platí $f \circ g = f \circ h$, tak $g = h$.
- b) Ak $X \neq \emptyset$ a pre ľubovoľné $g, h: X \rightarrow Y$ platí implikácia $f \circ g = f \circ h \Rightarrow g = h$, tak f je injekcia.

Úloha 2.4.4. Ak $f: X \rightarrow Y$ a $g: Y \rightarrow X$ sú zobrazenia také, že $g \circ f = id_X$, tak g je surjekcia a f je injekcia. Ukážte na príklade, že g nemusí byť injekcia a f nemusí byť surjekcia.

Úloha 2.4.5. Dokážte tvrdenie 2.4.10. Pre časti tvrdenia, ktoré obsahujú inklúziu a nie rovnosť, nájdite príklady ukazujúce, že nerovnosť môže byť ostrá (rovnosť nemusí vždy platiť).

Úloha 2.4.6. Nech $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie a $A, B \subseteq X$. Pokúste sa dokázať $f[A \cap B] \subseteq f[A] \cap f[B]$ použitím faktu, že pre ľubovoľné $C \subseteq D \subseteq X$ platí $f[C] \subseteq f[D]$. (Inak povedané, skúste dokázať prvú časť tvrdenia 2.4.10 (v) použitím prvej časti tvrdenia 2.4.10 (xiii).)

Úloha 2.4.7. Nech $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie. Dokážte, že f je injekcia práve vtedy, keď pre ľubovoľné dve podmnožiny $A, B \subseteq X$ platí $f[A \cap B] = f[A] \cap f[B]$.

Úloha 2.4.8. Nech $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie. Dokážte, že f je injekcia $\Leftrightarrow$ pre ľubovoľné dve podmnožiny $A, B \subseteq X$ platí $f[B \setminus A] = f[B] \setminus f[A]$.

Úloha 2.4.9. Predpokladajme, že $f: X \rightarrow Y$ je zobrazenie. Zapište pomocou kvantifikátorov výroky „ f je injekcia“ a „ f je surjekcia“ a znegujte tieto výroky.

Úloha 2.4.10. Nech X, Y sú konečné množiny, ktoré majú rovnaký počet prvkov. Dokážte, že potom platí:

- a) Ak $f: X \rightarrow Y$ je injektívne zobrazenie, tak je aj bijektívne.
 - b) Ak $f: X \rightarrow Y$ je surjektívne zobrazenie, tak je aj bijektívne.
- (Hint: Môže vám pomôcť holubníkový princíp.)

Kapitola 3

Kardinálne čísla

V tejto kapitole zavedieme pojem kardinality, čo je azda najužitočnejší a najdôležitejší pojem teórie množín. Zjednodušene povedané, ide o rozšírenie pojmu počtu prvkov množiny na nekonečné množiny.

3.1 Porovnávanie mohutností množín

Lahko vidíme, že dve konečné množiny majú rovnaký počet prvkov práve vtedy, keď medzi nimi existuje bijekcia (vieme nájsť jednojednoznačné priradenie medzi ich prvkami). Toto pozorovanie motivuje spôsob, ktorým by sme chceli zaviesť pojem analogický k počtu prvkov aj pre nekonečné množiny.

Definícia 3.1.1. Hovoríme, že množiny X a Y majú rovnakú *kardinalitu* (*mohutnosť*), ak existuje bijekcia $f: X \rightarrow Y$. Označujeme $|X| = |Y|$.

Poznámka 3.1.2. Je užitočné si všimnúť, že ak $|X| = |Y|$ a $|Y| = |Z|$, tak aj $|X| = |Z|$. (Vyplyva to z toho, že zložením dvoch bijekcií dostaneme opäť bijekciu.)

Ďalšie očividné vlastnosti sú, že $|X| = |X|$ platí pre každú množinu X (lebo $id_X: X \rightarrow X$ je bijekcia) a ak $|X| = |Y|$, tak $|Y| = |X|$ (stačí využiť inverzné zobrazenie).

Hoci uvedená definícia nie je zložitá, predsa len si zaslúži istý komentár.

Poznámka 3.1.3. Znak $=$ zvykneme písať medzi nejaké dva objekty v prípade, že sú totožné. V definícii 3.1.1 sme však symbol rovnosti použili v trochu inom význame. Jedna možnosť, ako sa na to pozeráť, je skutočne všetky výskyty zápisov tvaru $|X| = |Y|$ chápať ako iný zápis pre to, že existuje bijekcia medzi X a Y . Pozorovanie z poznámky 3.1.2 do istej miery oprávňuje použitie symbolu $=$, lebo ukazuje, že vzťah „mať rovnakú mohutnosť“ má skutočne podobné vlastnosti ako rovnosť.

Oveľa lepšie by bolo, keby sme skutočne boli schopní definovať nejaké objekty, ktoré by zodpovedali symbolu $|X|$. (Inak povedané, chceli by sme ľubovoľnej množine X priradiť konkrétnu množinu, ktorú označíme $|X|$.) To sa skutočne dá urobiť v rámci axiomatickej teórie ZFC. Na tejto prednáške to robiť nebudeme, uspokojíme sa s takýmto (jednoduchším) pohľadom na kardinálne čísla.

Nášim najbližším cieľom je presvedčiť sa, že mnohé veci, ktoré vieme robiť s prirodzenými číslami, fungujú aj pre kardinálne čísla. Ako prvú vec sa kardinálne čísla naučíme porovnávať.

Definícia 3.1.4. Hovoríme, že *kardinalita* množiny X je *menšia alebo rovná* ako kardinalita množiny Y , označujeme $|X| \leq |Y|$, ak existuje injekcia z X do Y .

Ak platí $|X| \leq |Y|$ ale X a Y nemajú rovnakú kardinalitu, tak hovoríme, že X má *menšiu kardinalitu* ako množina Y , označujeme $|X| < |Y|$.

$$|X| < |Y| \Leftrightarrow |X| \leq |Y| \wedge |X| \neq |Y|$$

Lahko sa overí, že nerovnosť medzi kardinálnymi číslami je dobre definovaná, t.j. ak $|X| = |X'|$ a $|Y| = |Y'|$, tak platí $|X| \leq |Y| \Leftrightarrow |X'| \leq |Y'|$.

Prirodzená otázka je, či aj pre nerovnosť kardinálnych čísel platí reflexívnosť, tranzitívnosť a antisymetria. Na prvé dve časti tejto otázky vieme odpovedať okamžite, tretia bude o čosi náročnejšia, odpoveď na ňu je však tiež pozitívna.

Tvrdenie 3.1.5. *Nech X, Y, Z sú ľubovoľné množiny. Potom platí:*

- (i) $|X| \leq |X|$;
- (ii) $|X| \leq |Y| \wedge |Y| \leq |Z| \Rightarrow |X| \leq |Z|$
- (iii) $|X| = |Y| \Rightarrow |X| \leq |Y|$

Dôkaz. (i) $id_X: X \rightarrow X$ je injekcia.

(ii) Zloženie dvoch injekcií je injekcia.

(iii) Každá bijekcia je injekcia. □

Teraz dokážeme veľmi dôležitú Cantor-Bernsteinovu vetu, ktorá ukazuje platnosť antisymetrie pre porovnávanie kardinalít.

Veta 3.1.6 (Cantor-Bernstein). *Nech X, Y sú množiny. Ak platí $|X| \leq |Y|$ a $|Y| \leq |X|$, tak $|X| = |Y|$.*

$$|X| \leq |Y| \wedge |Y| \leq |X| \Rightarrow |X| = |Y|$$

Inak: Ak existuje injekcia $f: X \rightarrow Y$ a injekcia $g: Y \rightarrow X$, tak existuje bijekcia $h: X \rightarrow Y$.

Túto vetu budeme veľmi často využívať, ak budeme chcieť dokázať, že dve množiny majú rovnakú kardinalitu. Mnohokrát je totiž jednoduchšie skonštruovať injekcie oboma smermi, než priamo nájsť bijekciu medzi danými množinami.

Uvedieme dva dôkazy tejto vety, základná myšlienka je v oboch veľmi podobná. Budeme sa snažiť ukázať existenciu takej podmnožiny $C \subseteq X$, pre ktorú je $f|_C$ bijekcia medzi C a $f[C]$ a $g|_{Y \setminus f[C]}$ je bijekcia medzi $X \setminus C$ a $Y \setminus f[C]$, pozri obrázok 3.1. Z týchto dvoch bijekcií už potom vieme poskladať bijekciu medzi X a Y .

Dôkaz. Nech $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow X$ sú injekcie. Definujme zobrazenie $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ predpisom

$$F(A) = X \setminus g[Y \setminus f[A]].$$

Ďalej indukciou definujeme množiny $A_n, n \in \mathbb{N}$ nasledovne:

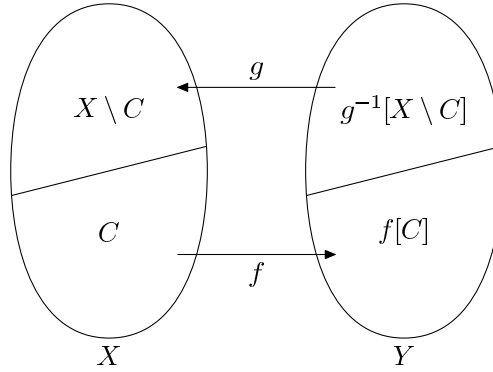
$$A_0 = \emptyset,$$

$$A_{n+1} = F(A_n)$$

$$\text{a položíme } C := \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n.$$

Potom platí

$$\begin{aligned} F(C) &= F\left(\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n\right) = X \setminus g[Y \setminus f[\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n]] = X \setminus g[Y \setminus \bigcup_{n=0}^{\infty} f[A_n]] = X \setminus g[\bigcap_{n=1}^{\infty} (Y \setminus f[A_n])] = \\ &= X \setminus \bigcap_{n=0}^{\infty} g[Y \setminus f[A_n]] = \bigcup_{n=0}^{\infty} (X \setminus g[Y \setminus f[A_n]]) = \bigcup_{n=0}^{\infty} F(A_n) = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = C. \end{aligned} \quad (3.1)$$



Obr. 3.1: Ilustrácia k dôkazu Cantor-Bernsteinovej vety

V predchádzajúcich úpravách sme použili viackrát tvrdenie 2.4.10 a fakt, že zobrazenia f a g sú injektívne a tiež de Morganove zákony z tvrdenia 2.2.15.

Ukázali sme teda, že pre množinu C platí $F(C) = C$, čo je ekvivalentné s rovnosťami $C = X \setminus g[Y \setminus f[C]]$,

$$X \setminus C = g[Y \setminus f[C]].$$

Definujme teraz zobrazenie $h: X \rightarrow Y$ nasledovne:

$$h(x) = \begin{cases} f(x), & \text{ak } x \in C, \\ y, & \text{kde } y \in Y \text{ je prvok s vlastnosťou } g(y) = x \text{ ak } x \notin C. \end{cases} \quad (3.2)$$

Tento predpis skutočne definuje zobrazenie: Každý prvok x množiny X buď patrí do C alebo do $X \setminus C$, čiže sa použije práve jedna z uvedených dvoch vetiev. Ak $x \in X \setminus C$, tak existuje $y \in Y$ s vlastnosťou $g(y) = x$, lebo $X \setminus C = g[Y \setminus f[C]]$. Súčasne z injektívnosti g existuje jediný taký y .

Ukážeme ďalej, že toto zobrazenie je bijektívne. Overme najprv injektívnosť. Nech platí $h(x_1) = h(x_2)$. Rozlíšme tri možnosti, ktoré môžu nastať:

- Oba prvky sú z množiny C , t.j. $x_1, x_2 \in C$. Potom ak $h(x_1) = h(x_2)$, tak $f(x_1) = f(x_2)$ a z injektívnosti f dostaneme $x_1 = x_2$.
- Jeden z týchto prvkov je z C a druhý patrí do $X \setminus C$. Nech napríklad $x_1 \in C$ a $x_2 \in X \setminus C$. Ak $h(x_1) = h(x_2)$, tak máme $g(f(x_1)) = x_2$. Potom $x_2 \in g[f[C]]$ a súčasne $x_2 \in X \setminus C = g[Y \setminus f[C]]$, z čoho dostaneme $x_2 \in g[f[C]] \cap g[Y \setminus f[C]] = g[f[C] \cap (Y \setminus f[C])] = g[\emptyset] = \emptyset$, čo je samozrejme spor. (Tu sme využili injektívnosť zobrazenia g , pozri tvrdenie 2.4.10 (v).)
- Oba prvky sú v $X \setminus C$, t.j. $x_1, x_2 \in X \setminus C$. Potom z $h(x_1) = h(x_2) = y$ vyplýva $g(y) = x_1 = x_2$.

Ešte zostáva overiť surjektívnosť. Ak $y \in Y$, tak môžu nastať dva prípady. Buď $y \in f[C]$ a potom $y = f(c)$ pre nejaké $c \in C$, čo znamená, že $y = h(c)$. Ak $y \in Y \setminus f[C]$, tak $g(y) \in X \setminus C = g[Y \setminus f[C]]$, čo podľa definície zobrazenia h znamená, že $y = h(g(y))$. $\square$

Uvedený dôkaz má nevýhodu, že využíva matematickú indukciu a prirodzené čísla. Ak by sme pracovali v rámci axiomatickej teórie množín, musela by tomuto dôkazu predchádzať konštrukcia prirodzených čísel iba na základe axióm. (Aj keď tak ako pracujeme my – v navivnej teórii čísel – by nás zrejme aj takýto dôkaz uspokojil.) Môžeme si však ukázať aj iný dôkaz, ktorý prirodzené čísla ani matematickú indukciu nevyužíva.

Dôkaz. Opäť budeme predpokladať, že $f: X \rightarrow Y$ a $g: Y \rightarrow X$ sú injekcie a zdefinujeme zobrazenie $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ presne rovnako, ako v predchádzajúcom dôkaze, t.j.

$$F(A) = X \setminus g[Y \setminus f[A]].$$

Budeme sa snažiť ukázať, že existuje množina C s vlastnosťou $F(C) = C$, konštrukcia bijekcie h pomocou tejto množiny už je rovnaká ako v predchádzajúcom dôkaze.

Najprv ukážeme, že zobrazenie F je monotónne (vzhľadom na čiastočné usporiadanie $\subseteq$). Tým máme na mysli, že pre $A, B \subseteq X$ platí implikácia

$$A \subseteq B \quad \Rightarrow \quad F(A) \subseteq F(B).$$

Ak $A \subseteq B$, tak použitím tvrdení 2.2.15(xi) a 2.4.10 postupne dostaneme

$$\begin{aligned} f[A] &\subseteq f[B] \\ Y \setminus f[A] &\supseteq Y \setminus f[B] \\ g[Y \setminus f[A]] &\supseteq g[Y \setminus f[B]] \\ X \setminus g[Y \setminus f[A]] &\subseteq X \setminus g[Y \setminus f[B]] \\ F(A) &\subseteq F(B) \end{aligned}$$

Položme $\mathcal{S} := \{B \subseteq X; B \subseteq F(B)\}$ a $C := \bigcup \mathcal{S} = \bigcup \{B \subseteq X; B \subseteq F(B)\}$.

Ak $B \in \mathcal{S}$, tak $B \subseteq C$, a teda $F(B) \subseteq F(C)$.

Teda pre každé $B \in \mathcal{S}$ platí $B \subseteq F(B) \subseteq F(C)$, z čoho vyplýva $C = \bigcup_{B \in \mathcal{S}} B \subseteq F(C)$.

Zistili sme teda, že $C \subseteq F(C)$. Z monotónnosti potom vyplýva $F(C) \subseteq F(F(C))$, čo znamená, že $F(C) \in \mathcal{S}$. Teda $F(C)$ je jedna z množín, ktoré zjednocujeme, čo znamená, že $F(C) \subseteq C$.

Zistili sme, že platia obe inklúzie, čiže $C = F(C)$. □

Poznámka 3.1.7. Pre čitateľa, ktorý sa zaoberal teóriou zväzov, môže byť zaujímavé všimnúť si, že sme v dôkaze vlastne zostrojili zobrazenie $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$, ktoré je monotónne. Na dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety nám stačilo nájsť pevný bod tohoto zobrazenia. Jeho existencia vyplýva z Knaster-Tarského vety o pevnom bode, keďže $(\mathcal{P}(X), \subseteq)$ je úplný zväz. Takýmto spôsobom je dokázaná Cantor-Bernsteinova veta napríklad v [F, Theorem 3.1.9], [KLŠZ, Príklad 2.3.6]. (V podstate náš dôkaz bol do značnej miery podobný spôsobu, akým sa dokazuje Knaster-Tarského veta, resp. prvý z uvedených dôkazov sa väčšmi ponášal na dôkaz Kleeneho vety o pevnom bode.)

Niečo viac o týchto výsledkoch dá dočítať v časti 6.2.

Doteraz dokázané výsledky o nerovnostiach medzi kardinálmi môžeme preformulovať aj nasledovným spôsobom:

Veta 3.1.8. *Nech a, b, c sú kardinálne čísla. Potom platí:*

- (i) $a \leq a$;
- (ii) $a \leq b \wedge b \leq a \Rightarrow a = b$;
- (iii) $a = b \Rightarrow a \leq b$;
- (iv) $a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \leq c$.

Poznámka 3.1.9. V tomto kontexte je ďalšou prirodzenou otázkou to, či sú ľubovoľné dve kardinálne čísla porovnateľné. Ekvivalentne to môžeme sformulovať aj ako otázku, či pre ľubovoľné dve množiny A, B vždy existuje injekcia $A \rightarrow B$ alebo injekcia $B \rightarrow A$.

Je to skutočne pravda, dôkaz využíva axiómu výberu.¹ My tento fakt dokazovať nebudeme. Ale to, že naozaj platí, azda stojí za zmienku.

¹Ak stihneme, axiómu výberu si sformulujeme a niečo málo o nej aj povieme koncom semestra. Pri dôkazoch, ktoré ju používajú, na to upozorníme – hoci sme zatiaľ ani nepovedali, čo vlastne táto axióma hovorí.

Cvičenia

Úloha 3.1.1. Pokúste sa urobiť dôkaz vety 3.1.6 (Cantor-Bernstein) tak, že položíte $C = \bigcap \{B \subseteq X; B \supseteq F(B)\}$.

Úloha 3.1.2. Rozhodnite o platnosti nasledujúceho tvrdenia. (Svoju odpoveď zdôvodnite, t.j. dokážte toto tvrdenie alebo nájdite kontrapríklad.)

Pre ľubovoľné množiny A, B platí $|A| < |B|$ práve vtedy, keď existuje bijekcia medzi množinou A nejakou vlastnou podmnožinou množiny B .

Úloha 3.1.3. Nech A, B sú ľubovoľné množiny. Dokážte (s použitím axiómy výberu), že $|f[A]| \leq |A|$.

3.2 Kardinálna aritmetika

Základné operácie s kardinálnymi číslami, ktoré zavedieme, sú súčet, súčin a umocňovanie kardinálnych čísel.

Definícia 3.2.1. Nech a, b sú kardinálne čísla a nech A, B sú množiny také, že $|A| = a$, $|B| = b$. Potom:

- (i) Predpokladajme navyše, že množiny A a B sú disjunktné. Potom *súčet kardinálnych čísel* a a b je kardinálne číslo množiny $A \cup B$, t.j.

$$a + b = |A \cup B|.$$

- (ii) *Súčin kardinálnych čísel* a a b je kardinálne číslo množiny $A \times B$, t.j.

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

- (iii) Kardinálne číslo a *umocnené* na kardinálne číslo b je kardinalita množiny všetkých zobrazení z B do A . Túto množinu budeme označovať A^B . T.j. $a^b = |A^B|$, kde

$$A^B = \{f; f \text{ je zobrazenie z } B \text{ do } A\}.$$

V prvej časti definície navyše požadujeme, aby množiny A a B boli disjunktné. Ak sme už našli množiny A, B splňajúce $|A| = a$ a $|B| = b$, tak namiesto nich môžeme zobrať napríklad množiny $A \times \{\emptyset\}$ a $B \times \{\{\emptyset\}\}$. Tieto množiny majú takú istú kardinalitu a určite sú disjunktné.²

Takisto má zmysel pýtať sa, či sú tieto operácie dobre definované. Inými slovami, či nezávisia od voľby množín A, B s uvedenými vlastnosťami. Presvedčíme sa, že je to v poriadku pri súčine a umocňovaní kardinálov, ostatné operácie ponechávame na rozmyslenie čitateľovi.

Lema 3.2.2. *Sčítovanie kardinálov je dobre definované.*

Dôkaz. Cvičenie. □

Lema 3.2.3. *Násobenie kardinálov je dobre definované.*

Dôkaz. Máme teda vlastne ukázať, že ak $|A| = |A'|$ a $|B| = |B'|$, tak aj $|A \times B| = |A' \times B'|$. Uvedené predpoklady znamenajú, že existujú bijekcie $f: A \rightarrow A'$ a $g: B \rightarrow B'$. Potom podľa tvrdenia 2.4.12 je zobrazenie $f \times g: A \times B \rightarrow A' \times B'$ tiež bijekcia. □

²Stačí si uvedomiť, že bez ohľadu na to aké sú $a \in A, b \in B$, určite platí $(a, 0) \neq (b, 1)$.

Lema 3.2.4. *Umocňovanie kardinálov je dobre definované.*

Dôkaz. Teraz chceme ukázať, že existujú bijekcie $f: A \rightarrow C$ a $g: B \rightarrow D$, tak existuje aj bijekcia medzi množinami A^B a C^D .

To znamená, že ku každému zobrazeniu $h: B \rightarrow A$ chceme priradiť zobrazenie z D do C .

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{g} & D \\ h \downarrow & & \downarrow ? \\ A & \xrightarrow{f} & C \end{array}$$

Keď si uvedomíme, že g je bijekcia, a teda existuje $g^{-1}: D \rightarrow B$, tak môžeme definovať $\varphi: A^B \rightarrow C^D$ predpisom

$$\varphi(h) = f \circ h \circ g^{-1}.$$

Chceli by sme ukázať, že φ je bijekcia. Jedna z možností, ako to overiť, je nájsť inverzné zobrazenie k φ .

Vieme nájsť zobrazenie $\psi: C^D \rightarrow A^B$ podobným spôsobom ako sme našli φ .

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{g} & D \\ ? \downarrow & & \downarrow k \\ A & \xrightarrow{f} & C \end{array}$$

$$\psi(k) = f^{-1} \circ k \circ g.$$

Overme, že ψ je naozaj inverzné zobrazenie k φ .

Pre ľubovoľné $h \in A^B$ máme

$$\psi(\varphi(h)) = f^{-1} \circ (f \circ h \circ g^{-1}) \circ g = (f^{-1} \circ f) \circ h \circ (g^{-1} \circ g) = h.$$

Podobne dostaneme, že

$$\varphi(\psi(k)) = f \circ (f^{-1} \circ k \circ g) \circ g^{-1} = (f \circ f^{-1}) \circ k \circ (g \circ g^{-1}) = k.$$

Zistili sme, že φ má inverzné zobrazenie, čo znamená, že φ je bijekcia. □

Spôsob, akým sme zaviedli operácie na kardinálnych číslach je pomerne prirodzený – pri najmenšom pre konečné množiny funguje tak, ako obvyklé sčítovanie, násobenie a umocňovanie. Lahko si uvedomíte, že ak máme m -prvkovú a n -prvkovú množinu, ktoré sú disjunktné, tak ich zjednotenie má $m + n$ prvkov. Takisto karteziánsky súčin m -prvkovej a n -prvkovej množiny má $m \cdot n$ prvkov a zobrazení z n -prvkovej množiny do m -prvkovej je m^n (pre každý z n prvkov mám práve m možností výberu jeho obrazu).

Tu si môžeme súčasne uvedomiť, že platí $0^0 = 1$, keďže $\emptyset^\emptyset = \{\emptyset\}$. Prázdna množina $\emptyset$ je totiž jediná podmnožina $\emptyset \times \emptyset = \emptyset$, teda jediná relácia na množine $\emptyset$. Lahko vidno, že táto relácia spĺňa definíciu zobrazenia.

O chvíľu si ukážeme niektoré vlastnosti kardinálnej aritmetiky (mnohé z nich sú do istej miery podobné na aritmetiku prirodzených čísel, ale v niektorých veciach je zasa počítanie s kardinálmi výrazne odlišné). Ešte predtým však skúsme zadefinovať niektoré konkrétne kardinálne čísla.

Definícia 3.2.5. Ľubovoľné prirodzené číslo n budeme stotožňovať s kardinálnym číslom n -prvkovej množiny. Teda napríklad $|\emptyset| = 0$, $|\{\emptyset\}| = 1$ a $|\{\emptyset, \{\emptyset\}\}| = 2$.

Kardinálne číslo množiny prirodzených čísel budeme označovať $\aleph_0$. Kardinálne čísla menšie než $\aleph_0$ voláme *konečné*. Kardinálne číslo a voláme *nekonečné*, ak $a \geq \aleph_0$.

Kardinálne číslo množiny $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ budeme označovať $\mathfrak{c}$. (Toto kardinálne číslo sa niekedy nazýva *kardinalita kontinua*.)

Poznámka 3.2.6. Zatiaľ ešte nemáme dokázané, že pre každé kardinálne číslo platí buď $a < \aleph_0$ alebo $a \geq \aleph_0$, teda že musí byť buď konečné alebo nekonečné. Ako sme už spomenuli v poznámke 3.1.9, na to aby ľubovoľné dve kardinálne čísla boli porovnateľné potrebujeme axiómu výberu. Pretože s axiómou výberu na tejto prednáške budeme pracovať málo alebo vôbec, uspokojíme sa s takouto definíciou – aj keď s doterajšími vedomosťami nevieme ukázať, že tieto dva prípady už vyčerpávajú všetky možnosti.

Označenie $\mathfrak{c}$ a názov kardinalita kontinua pochádza z toho, že $\mathfrak{c}$ je kardinalita množiny $\mathbb{R}$. Tento fakt overíme neskôr – tvrdenie 3.5.2. Už teraz ukážeme, že $\mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$.

Veta 3.2.7. *Nech X je ľubovoľná množina. Potom platí*

$$|\mathcal{P}(X)| = 2^{|X|}.$$

Dôkaz. Chceme ukázať existenciu bijekcie medzi množinami $\{0, 1\}^X$ a $\mathcal{P}(X)$.

Na to stačí nájsť zobrazenia $f: \mathcal{P}(X) \rightarrow \{0, 1\}^X$ a $g: \{0, 1\}^X \rightarrow \mathcal{P}(X)$, ktoré sú navzájom inverzné. Definujeme ich predpisom

$$\begin{aligned} f(A) &= \chi_A & \text{pre } A \subseteq X, \\ g(h) &= \{x \in X; h(x) = 1\} & \text{pre } h: X \rightarrow \{0, 1\}, \end{aligned}$$

kde $\chi_A(x) = 1$ pre $x \in A$ a $\chi_A(x) = 0$ pre $x \notin A$, čiže χ_A je charakteristická funkcia množiny A . (Skutočne platí $g(f(A)) = \{x \in X; \chi_A(x) = 1\} = A$ a $f(g(h)) = \chi_{\{x \in X; h(x)=1\}} = h$ pre ľubovoľné $A \in \mathcal{P}(X)$ a $h \in \{0, 1\}^X$.)

Keďže k zobrazeniu f existuje inverzné zobrazenie, je to bijekcia. $\square$

Dôsledok 3.2.8.

$$\mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$$

3.2.1 Vlastnosti sčítovania kardinálov

V tejto a nasledujúcich častiach budeme dokazovať niektoré rovnosti a nerovnosti, ktoré platia pre kardinálne operácie. Keďže postup pri všetkých dôkazoch je veľmi podobný, môžete si niekoľko pozrieť, aby ste videli základný princíp, ktorý sa v nich používa. Potom sa ostatné môžete pokúsiť dokázať samostatne a len ak si s nimi nebudete vedieť poradiť, pozrite sa na dôkazy, ktoré sú uvedené tu.

Začnem s tvrdením, kde vynechám dôkaz. (Môžete sa nad ním zamyslieť samostatne.) Uviedol som toto tvrdenie hlavne preto, aby sme si uvedomili, že keď sme nejakým spôsobom zaviedli sčítovanie kardinálov, tak by sme mali zdôvodniť aj vlastnosti, ktoré sa nám na prvý pohľad môžu zdať samozrejmé. (A pri obvyklom sčítovaní *konečných čísel* s nimi nemáme problém.) Podobný charakter má aj tvrdenie 3.2.14 o súčine kardinálnych čísel a tvrdenie 3.2.19 o umocňovaní.

Tvrdenie 3.2.9. *Pre ľubovoľné kardinálne číslo a platí*

$$a + 0 = a.$$

Dôkaz. Cvičenie. □

Veta 3.2.10. *Nech a, b, c sú kardinálne čísla, potom platí*

$$\begin{aligned} a + b &= b + a \\ a + (b + c) &= (a + b) + c \end{aligned}$$

Dôkaz. Najprv ukážme prvú rovnosť. Nech A, B sú disjunktné množiny také, že $|A| = a$ a $|B| = b$. Tvrdenie, že $|A| + |B| = |B| + |A|$ znamená, že existuje bijekcia medzi $A \cup B$ a $B \cup A$. To ale vyplýva z rovnosti $A \cup B = B \cup A$ a z toho, že identické zobrazenie je bijektívne.

Druhú rovnosť dostaneme podobným spôsobom z rovnosti $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$. □

Veta 3.2.11. *Nech a, b, c sú kardinálne čísla také, že $b \leq c$. Potom*

$$a + b \leq a + c.$$

Dôkaz. Nech A, B, C sú množiny také, že $|A| = a$, $|B| = b$, $|C| = c$ a súčasne platí $A \cap B = A \cap C = \emptyset$. Ďalej predpokladáme, že existuje injektia $f: B \rightarrow C$. Chceme ukázať existenciu injektie z $A \cup B$ do $A \cup C$.

Definujeme zobrazenie $g: A \cup B \rightarrow A \cup C$ ako

$$g(x) = \begin{cases} x & \text{ak } x \in A, \\ f(x) & \text{ak } x \in B. \end{cases}$$

Z toho, že A a B sú disjunktné, vyplýva, že g je skutočne zobrazenie.

Takisto sa vcelku ľahko ukáže, že zobrazenie g je injektívne. Predpokladajme, že $g(x) = g(y)$. Uvažujme najprv možnosť $x \in A$, čo znamená, že $g(x) = x$. Potom $y \notin B$, lebo z $y \in B$ by vyplývalo, že $g(y) \in C$ a $C \cap A = \emptyset$. Teda $y \in A$ a $g(y) = y$, čiže rovnosť $g(x) = g(y)$ znamená priamo $x = y$.

Teraz predpokladajme, že platí $g(x) = g(y)$ a $x \in B$. To znamená, že $g(x) = f(x)$. Súčasne to znamená, že $y \in B$. (Ak by platilo $y \in A$, tak $g(x) = y \in C \cap A = \emptyset$.) Potom máme $g(y) = f(y)$. Teda z $g(x) = g(y)$ vyplýva $f(x) = f(y)$ a, keďže f je injektia, aj rovnosť $x = y$. □

Pri dôkaze tejto vety sa oplatí všimnúť si jednu všeobecnú zákonitosť. V dôkaze sme mohli použiť ľubovoľnú množinu B takú, že $|B| = b$ (a súčasne $A \cap B = \emptyset$). Takouto množinou je aj množina $f[B]$, pretože $f: B \rightarrow f[B]$ je bijekcia.

To znamená, že pri vhodnej voľbe množiny B môžeme priamo predpokladať $B \subseteq C$. Tým sa dôkaz značne zjednoduší – z tvrdenia 2.2.12(iii) vieme, že potom $A \cup B \subseteq A \cup C$. Z toho už je jasná existencia injektie definovanej jednoducho ako $x \mapsto x$ pre všetky $x \in A \cup B$.

Príklad 3.2.12. Priamo, konštrukciou príslušnej bijektie, ukážeme, že platí

$$\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0.$$

Uvažujme množiny $\mathbb{N} \times \{0\}$ a $\mathbb{N} \times \{1\}$. Obidve majú kardinalitu $\aleph_0$ a navyše sú disjunktné. Stačí ukázať, že existuje bijekcia medzi $\mathbb{N} \times \{0\} \cup \mathbb{N} \times \{1\}$ a $\mathbb{N}$. Bijekciu môžeme definovať napríklad ako

$$\begin{aligned} f(n, 0) &= 2n, \\ f(n, 1) &= 2n + 1. \end{aligned}$$

Pre každé prirodzené číslo platí $0 \leq n \leq \aleph_0$ (keďže $\emptyset \subseteq \{0, 1, \dots, n-1\} \subseteq \mathbb{N}$), z čoho dostávame

$$\aleph_0 = 0 + \aleph_0 \leq n + \aleph_0 \leq \aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$$

Z Cantor-Bernsteinovej vety potom máme

$$\aleph_0 = n + \aleph_0 = \aleph_0 + \aleph_0.$$

Z toho vidíme napríklad aj to, že výsledok analogický k vete 3.2.11 neplatí pre ostrú nerovnosť.

Dôkaz nasledujúceho tvrdenia je založený na podobnej myšlienke ako predchádzajúci dôkaz.

Tvrdenie 3.2.13. *Ak a je nekonečné kardinálne číslo, tak $\aleph_0 + a = a$.*

Dôkaz. Máme vlastne dokázať, že ak A je taká množina, že $|A| = a \geq \aleph_0$, tak $|\mathbb{N} \times \{0\} \cup A \times \{1\}| = |A|$.

Predpoklad $|A| \geq \aleph_0$ znamená, že existuje injekcia $\mathbb{N} \rightarrow A$. Môžeme priamo predpokladať, že $\mathbb{N} \subseteq A$.

Teraz už vieme veľmi jednoducho zostrojiť bijekciu medzi $\mathbb{N} \times \{0\} \cup A \times \{1\}$ a A analogickým spôsobom ako v predchádzajúcom príklade.

$$\begin{aligned} f(n, 0) &= 2n, \text{ pre } n \in \mathbb{N} \\ f(n, 1) &= 2n + 1, \text{ pre } n \in \mathbb{N} \\ f(a, 1) &= a, \text{ ak } a \in A, a \notin \mathbb{N} \end{aligned}$$

□

3.2.2 Vlastnosti násobenia kardinálov

Tvrdenie 3.2.14. *Pre ľubovoľné kardinálne číslo a platí*

$$\begin{aligned} 0 \cdot a &= 0 \\ 1 \cdot a &= a \\ 2 \cdot a &= a + a \end{aligned}$$

Dôkaz. Cvičenie.

□

Veta 3.2.15. *Nech a, b, c sú kardinálne čísla, potom platí*

$$\begin{aligned} ab &= ba \\ a(bc) &= (ab)c \\ a(b+c) &= ab + ac \end{aligned}$$

Dôkaz. Nech A, B, C sú ľubovoľné množiny.

Na dôkaz prvého tvrdenia stačí ukázať existenciu bijekcie medzi $A \times B$ a $B \times A$. Zobrazenie $f: A \times B \rightarrow B \times A$ definovaný predpisom

$$f: (a, b) \mapsto (b, a)$$

pre $a \in A, b \in B$ je bijekcia.

Na dôkaz druhej časti stačí nájsť bijekciu $g: A \times (B \times C) \rightarrow (A \times B) \times C$. Takouto bijekciou je zobrazenie definované ako

$$g: (a, (b, c)) \mapsto ((a, b), c)$$

pre $a \in A, b \in B, c \in C$.

V tretej časti máme, za predpokladu, že B a C sú disjunktné, nájsť bijekciu medzi $A \times (B \cup C)$ a $(A \times B) \cup (A \times C)$. Z tvrdenia 2.3.3 však vieme, že platí dokonca rovnosť $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$. $\square$

Veta 3.2.16. *Nech a, b, c sú kardinálne čísla také, že $b \leq c$. Potom*

$$ab \leq ac.$$

Dôkaz. Nech $f: B \rightarrow C$ je injekcia. Potom podľa tvrdenia 2.4.12 je aj zobrazenie $id_A \times f: A \times B \rightarrow A \times C$ injekcia. $\square$

Opäť platí analogická poznámka ako pri vete 3.2.11. Mohli by sme priamo predpokladať, že $B \subseteq C$ a potom si stačí všimnúť, že $A \times B \subseteq A \times C$ (pozri úlohu 2.3.3).

Príklad 3.2.17. Ukážeme, že platí

$$\aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0. \quad (3.3)$$

Z rovnosti (3.3) dostaneme, že pre každé $n \in \mathbb{N}, n > 0$, platí

$$\aleph_0 \leq n \cdot \aleph_0 \leq \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0.$$

Z Cantor-Bernsteinovej vety potom vyplýva rovnosť

$$\aleph_0 = n \cdot \aleph_0 = \aleph_0 \cdot \aleph_0.$$

Na dôkaz rovnosti (3.3) nám stačí zostrojiť bijekciu medzi $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ a $\mathbb{N}$. Takýchto bijekcií sa dá nájsť veľa, ako prvú si ukážeme jednu veľmi známu pochádzajúcu už od G. Cantora.

Nasledujúci obrázok nám ukazuje, ako môžeme usporiadané dvojice prirodzených čísel

Diagram illustrating a sequence of points (i, j) in a grid, where i and j are non-negative integers. The points are arranged in rows and columns, with arrows indicating a path from $(0, 0)$ to (n, n) .

The points shown are:

- Row 0: $(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), (4, 0), \dots, (n, 0), \dots$
- Row 1: $(0, 1), (1, 1), (2, 1), (3, 1), (4, 1), \dots, (n, 1), \dots$
- Row 2: $(0, 2), (1, 2), (2, 2), (3, 2), (4, 2), \dots, (n, 2), \dots$
- Row 3: $(0, 3), (1, 3), (2, 3), (3, 3), (4, 3), \dots, (n, 3), \dots$
- Row 4: $(0, 4), (1, 4), (2, 4), (3, 4), (4, 4), \dots, (n, 4), \dots$
- Row n : $(0, n), (1, n), (2, n), (3, n), (4, n), \dots, (n, n), \dots$

Arrows indicate the path:

- From $(0, 0)$ to $(0, 1)$ (down arrow).
- From $(0, 1)$ to $(1, 1)$ (diagonal up-right arrow).
- From $(1, 1)$ to $(1, 2)$ (diagonal down-left arrow).
- From $(1, 2)$ to $(2, 2)$ (diagonal up-right arrow).
- From $(2, 2)$ to $(2, 3)$ (diagonal down-left arrow).
- From $(2, 3)$ to $(3, 3)$ (diagonal up-right arrow).
- From $(3, 3)$ to $(3, 4)$ (diagonal down-left arrow).
- From $(3, 4)$ to $(4, 4)$ (diagonal up-right arrow).
- From $(4, 4)$ to (n, n) (diagonal down-left arrow).

Toto zobrazenie vieme popísať aj jednoduchým predpisom. Všimnime si, že dvojice na tej istej diagonále (t.j. také dvojice (m, n)), ktoré majú rovnaký súčet $m + n$ zoraďujeme podľa prvej súradnice a všetky prvky z diagonál, ktoré sú naľavo od nich. Teda ak $m + n = s$, tak $1 + 2 + \dots + s = \frac{s(s+1)}{2}$ prirodzených čísel sme použili na predchádzajúce diagonály. Poradie na diagonále určíme podľa m , čiže dostaneme

(Môžete si túto formulu prekontrolovať pre niektoré konkrétne dvojice.)

Pokiaľ by vám však takýto argument nestačil, je tu pre vás aj podrobnejší formálny dôkaz.

$$f(m, n) = \Delta_{m+n} + m.$$

Takisto je zrejme, že $f(m, n) \in I_{m+n}$. Vďaka tomu z rovnosti $f(m+n) = f(m'+n')$ vyplýva $m+n = m'+n'$. Z $\Delta_{m+n} + m = \Delta_{m+n} + m'$ dostaneme $m = m'$, a teda aj $n = n'$. Tým je dokázaná injektívnosť zobrazenia f .

Overme ešte surjektívnosť. Vieme, že každé $x \in \mathbb{N}$ patrí do niektorej množiny I_a (keďže tieto množiny tvoria rozklad). Stačí teda nájsť m, n tak, že $m + n = a$ a $x = \Delta_a + m$. Z nerovnosti $\Delta_a \leq x \leq \Delta_{a+1} - 1$ a z toho, že $\Delta_{a+1} - \Delta_a = a + 1$ dostaneme, že pre $m = x - \Delta_a$ platí nerovnosť $0 \leq m \leq \Delta_{a+1} - 1 - \Delta_a = a$. Z toho vyplýva, že ak položíme $n = a - m$, tak m aj n sú prirodzené čísla a platí $f(m, n) = a$. $\square$

Inú bijekciu $g: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ môžeme dostať s použitím faktu, že každé prirodzené číslo väčšie ako 0 sa dá zapísať ako súčin mocniny čísla 2 a nepárneho čísla. (Toto viete odvodiť z poznatkov o deliteľnosti prirodzených čísel, ktoré máte z prvého ročníka [Č].) Teda zobrazenie

$$g(m, n) = 2^m(2n + 1) - 1$$

je bijekcia z $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ do $\mathbb{N}$.

Poznámka 3.2.18. S použitím axiómy výberu sa dá dokázať, že kardinálne sčítovanie a násobenie je jednoduché, pre ľubovoľné nekonečné kardinály a, b totiž platí

$$a + b = a \cdot b = \max\{a, b\}.$$

(Zatiaľ dokonca nevieme ani to, či existuje maximum z kardinálnych čísel a, b ; pozri poznámku 3.1.9.)

V tejto kapitole však budeme (v dôkazoch i cvičeniach) využívať iba veci, ktoré sme o kardinálnej aritmetike už dokázali.

3.2.3 Vlastnosti kardinálneho umocňovania

Opäť začnem tým, že spomeniem pár vlastností, kde dôkaz nechám ako cvičenie (a mali by byť pomerne jednoduché).

Tvrdenie 3.2.19. Pre ľubovoľné kardinálne číslo platí $a^1 = a$.

Pre kardinálne umocňovanie platí $0^0 = 1$ a pre $a \neq 0$ máme

$$a^0 = 1$$

$$0^a = 0$$

Pri prirodzených číslach sme používali označenie a^2 ako synonymum zápisu $a \cdot a$. (Podobne pre $a^3, a^4, \dots$) Ukážeme si, že aj pre kardinálne čísla predstavujú tieto dva zápisy to isté.

Tvrdenie 3.2.20. Ak a je ľubovoľné kardinálne číslo, tak platí

$$a^2 = a \cdot a.$$

Dôkaz. Máme vlastne ukázať, že pre ľubovoľnú množinu existuje bijekcia medzi $A^{\{0,1\}}$ a $A \times A$.

Definujme $\varphi: A^{\{0,1\}} \rightarrow A \times A$ ako

$$\varphi(f) = (f(0), f(1)).$$

Súčasne definujme $\psi: A \times A \rightarrow A^{\{0,1\}}$ tak, že $\psi(a, b)$ je zobrazenie určené predpisom

$$\psi(a, b)(0) = a,$$

$$\psi(a, b)(1) = b.$$

(Namiesto zápisu $\psi((a, b))$ píšeme stručnejšie $\psi(a, b)$.) Lahko sa overí, že φ a ψ sú navzájom inverzné zobrazenia, čiže φ aj ψ sú bijekcie. $\square$

Takisto by bolo ľahké rozšíriť toto tvrdenie indukciou na ďalšie prirodzené čísla. (Hoci sme zatiaľ stále formálne neskonštruovali prirodzené čísla a ani neukázali, že sú dobre usporiadané a teda na nich funguje indukcia.)

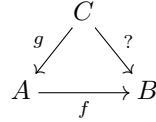
Veta 3.2.21. *Ak a, b, c sú kardinálne čísla také, že $a \leq b$, tak $a^c \leq b^c$.*

Dôkaz. Nech $|A| = a$, $|B| = b$, $|C| = c$. Môžeme priamo predpokladať, $A \subseteq B$. Potom platí aj $A^C \subseteq B^C$. (Každé zobrazenie z C do A je súčasne zobrazením z C do B .) $\square$

Napriek tomu, že máme takýto jednoduchý dôkaz, pokúsme sa ešte urobiť dôkaz priamo z existencie injekcie z A do B . (Aby sme si trochu precvičili prácu so zobrazeniami medzi množinami zobrazení – v ďalších dôkazoch budeme takéto niečo často potrebovať.)

Dôkaz. Vlastne máme dokázať: Ak existuje injekcia $f: A \rightarrow B$, tak existuje aj injekcia z množiny A^C do množiny B^C . Skúsme teda najprv vymyslieť, ako by sme pomocou zobrazenia f mohli definovať zobrazenie $\varphi: A^C \rightarrow B^C$ a pri troche šťastia sa nám ho snáď podarí vymyslieť tak, aby bolo injektívne a aj jeho injektívnosť dokázať.

Hľadáme teda zobrazenie, ktoré ľubovoľnej funkcii $g: C \rightarrow A$ priradí nejakú funkciu z C do B . Našu situáciu si môžeme znázorniť takto:



Hneď vidíme, že f a g určujú zobrazenie z C do B – konkrétne zobrazenie $f \circ g$. Teda asi najprirodzenejší spôsob ak definovať nejaké zobrazenie z A^C do B^C pomocou f je

$$\begin{aligned} \varphi: g &\mapsto f \circ g \\ \varphi(g) &= f \circ g \end{aligned}$$

Overme ešte, že toto zobrazenie je injektívne. Pýtame sa, či platí

$$\begin{aligned} \varphi(g_1) = \varphi(g_2) &\Rightarrow g_1 = g_2 \\ f \circ g_1 = f \circ g_2 &\Rightarrow g_1 = g_2 \end{aligned}$$

Rovnosť $f \circ g_1 = f \circ g_2$ znamená, že pre každé $x \in C$ platí

$$f(g_1(x)) = f(g_2(x)).$$

Pretože f je injektívne, vyplýva z nej rovnosť

$$g_1(x) = g_2(x).$$

Platnosť tejto rovnosti pre každé $x \in X$ znamená rovnosť zobrazení $g_1 = g_2$; čiže presne to, čo sme chceli dokázať. $\square$

Veta 3.2.22. *Ak a, b, c sú kardinálne čísla také, že $a \leq b$ a $c \neq 0$, tak*

$$c^a \leq c^b.$$

Dôkaz. Nech A, B, C sú množiny také, že $|A| = a$, $|B| = b$ a $|C| = c$.

Predpoklad $c \neq 0$ nám hovorí, že $C \neq \emptyset$. Zvoľme si ľubovoľné $c_0 \in C$.

Vieme, že existuje injekcia $f: A \rightarrow B$. Na základe už viackrát spomenutej úvahy môžeme priamo predpokladať, že $A \subseteq B$. Definujme zobrazenie $\varphi: C^A \rightarrow C^B$ tak, že

$$\varphi(g)(x) = \begin{cases} g(x) & \text{pre } x \in A, \\ c_0 & \text{pre } x \notin A. \end{cases}$$

pre ľubovoľné $g: A \rightarrow C$.

Zobrazenie φ je injekcia. Ak platí $\varphi(g) = \varphi(h)$, tak pre každé $x \in A$ platí $g(x) = \varphi(g)(x) = \varphi(h)(x) = h(x)$, a teda $g = h$. $\square$

Ešte si môžeme všimnúť, že v prípade $c = 0$ predchádzajúca veta neplatí. Priamo z definície kardinálneho umocňovania zistíme, že $0^0 = 1$ a $0^a = 0$ pre $a \neq 0$.

Ľubovoľné zobrazenia z X do $\emptyset$ je podmnožina $X \times \emptyset = \emptyset$. Teda ak existuje nejaké zobrazenie $X \rightarrow \emptyset$, môže to byť jedine $\emptyset$. V prípade $X = \emptyset$ množina $\emptyset$ spĺňa definíciu zobrazenia, v prípade $X \neq \emptyset$ nie. Teda máme $\emptyset^\emptyset = \{\emptyset\}$ a $\emptyset^A = \emptyset$ pre $A \neq \emptyset$.

Veta 3.2.23. *Pre ľubovoľné kardinálne čísla platí*

$$a^{b+c} = a^b \cdot a^c.$$

Dôkaz. Vlastne máme dokázať, že pre ľubovoľné množiny A, B, C také, že B a C sú disjunktné, existuje bijekcia medzi $A^{B \cup C}$ a $A^B \times A^C$.

T.j. chceli by sme nájsť zobrazenie $\varphi: A^{B \cup C} \rightarrow A^B \times A^C$ alebo zobrazenie $\psi: A^B \times A^C \rightarrow A^{B \cup C}$ a ukázať o ňom, že je bijekcia. My budeme postupovať tak, že nájdeme zobrazenia oboma smermi a ak sa nám podarí ukázať, že jedno z nich je inverzné k druhému, tak z toho vieme, že ide o bijekcie.

Aby sme definovali φ , tak vlastne potrebujeme každej funkcii $f: B \cup C \rightarrow A$ priradiť dvojicu funkcií – prvá z nich ide z B do A a druhá z C do A . Zobrazeniu z $B \cup C$ do A však vieme priradiť zobrazenie na menšej množine veľmi prirodzeným spôsobom – pôjde o zúženie zobrazenia na túto podmnožinu. Môžeme teda definovať zobrazenie $\varphi: A^{B \cup C} \rightarrow A^B \times A^C$ nasledovne:

$$\begin{aligned} \varphi: f &\mapsto (f|_B, f|_C) \\ \varphi(f) &= (f|_B, f|_C) \end{aligned}$$

Ak hľadáme zobrazenie $\psi: A^B \times A^C \rightarrow A^{B \cup C}$, tak vlastne každej dvojici zobrazení $g: B \rightarrow A$, $h: C \rightarrow A$ chceme priradiť zobrazenie z $B \cup C$ do A . Opäť, máme pomerne prirodzený spôsob, ako to môžeme spraviť, dvojici (g, h) priradíme zobrazenie definované predpisom

$$\psi(g, h)(x) = \begin{cases} g(x) & \text{ak } x \in B, \\ h(x) & \text{ak } x \in C. \end{cases}$$

Na tomto mieste využívame fakt, že B a C sú disjunktné – v opačnom prípade by predchádzajúci predpis nemusel definovať zobrazenie.

(Intuitívna predstava za predchádzajúcimi úvahami je asi takáto: Jedným smerom sme postupovali tak, že zobrazenie z $B \cup C$ do A sme rozdelili na 2 zobrazenia na 2 častiach definičného oboru. Zobrazenie ψ zase tieto 2 zobrazenia naspäť zlepiť – to je zhruba aj dôvod, prečo sú tieto 2 priradenia jedno k druhému inverzné; overíme to však podrobne.)

To, že ψ je inverzné zobrazenie k φ overíme, tak, že ukážeme, že pri zložení $\varphi \circ \psi$ aj $\psi \circ \varphi$ dostaneme identické zobrazenie.

Skúsme najprv vyrátať, čomu sa rovná $\psi \circ \varphi$. Pre ľubovoľné $f: B \cup C \rightarrow A$ máme $\psi(\varphi(f)) = \psi(f|_B, f|_C)$ po dosadení $x \in B \cup C$ dostaneme

$$\psi(\varphi(f))(x) = \psi(f|_B, f|_C)(x) = \begin{cases} f|_B(x) = f(x) & \text{ak } x \in B, \\ f|_C(x) = f(x) & \text{ak } x \in C, \end{cases}$$

teda $\psi(\varphi(f))(x) = f(x)$ pre každé $x \in B \cup C$, čiže zobrazenia $\psi(\varphi(f))$ a f sa rovnajú. Dostali sme:

$$\begin{aligned} (\forall f \in A^{B \cup C}) \quad \psi(\varphi(f)) &= f \\ \psi \circ \varphi &= id_{A^{B \cup C}} \end{aligned}$$

Zostáva nám ešte pozrieť sa na zobrazenie $\varphi \circ \psi: A^B \times A^C \rightarrow A^{B \times C}$. Ak máme ľubovoľnú dvojicu $g: B \rightarrow A$, $h: C \rightarrow A$, tak priamo z definície zobrazenia ψ vidno, že $\psi(g, h)|_B = g$ a $\psi(g, h)|_C = h$, a teda

$$\varphi(\psi(g, h)) = (\psi(g, h)|_B, \psi(g, h)|_C) = (g, h).$$

Teda $\varphi \circ \psi = id_{A^B \times A^C}$.

Zistili sme, že $\psi = \varphi^{-1}$, teda φ aj ψ sú bijekcie. □

Veta 3.2.24. Pre ľubovoľné kardinálne čísla platí $(a^b)^c = a^{bc}$.

Dôkaz. Pre ľubovoľné A, B, C chceme nájsť bijekciu medzi $(A^B)^C$ a $A^{B \times C}$. Opäť, pokúsime sa nájsť nejaké zobrazenia $\varphi: (A^B)^C \rightarrow A^{B \times C}$ a $\psi: A^{B \times C} \rightarrow (A^B)^C$ a ukázať, že sú navzájom inverzné.

Hľadáme zobrazenie $\varphi: (A^B)^C \rightarrow A^{B \times C}$. T.j. ak máme dané nejaké zobrazenie $f: C \rightarrow A^B$, chceli by sme k nemu nájsť niečo, čo dvojiciam $(b, c) \in B \times C$ priradí prvky z A . Pre ľubovoľné $c \in C$ však máme zobrazenie $f(c): B \rightarrow A$ – čiže je dosť prirodzené dvojici (b, c) priradiť $f(c)(b)$, t.j.

$$\begin{aligned} \varphi(f): B \times C &\rightarrow A \\ \varphi(f)(b, c) &= f(c)(b) \end{aligned}$$

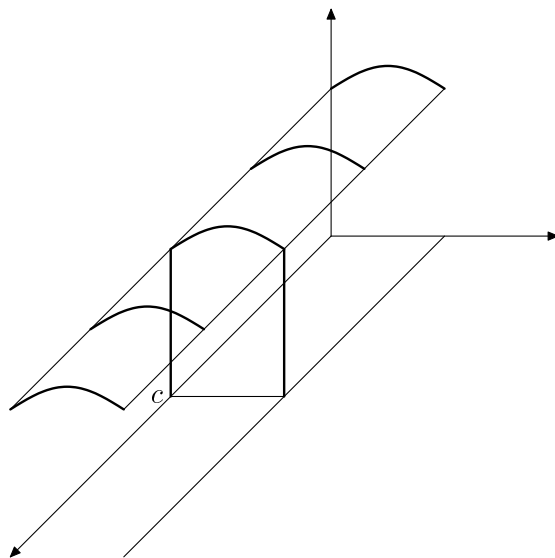
Obrátene, každému zobrazeniu $g: B \times C \rightarrow A$ by sme chceli priradiť zobrazenie $\psi(g): C \rightarrow A^B$, t.j. zobrazenie, ktoré každému prvku z C priradí nejaké zobrazenie z B do A . Ak máme dané zobrazenie z $B \times C$ do A , zafixujeme nejaké $c \in C$ a meníme len prvok $b \in B$ vidíme, že dostaneme zobrazenie z B do A . Presnejšie to môžeme zapísať

$$\begin{aligned} (\psi(g))(c): B &\rightarrow A \\ (\psi(g))(c)(b) &= g(b, c) \end{aligned}$$

Toto priradenie je načrtnuté na obr. 3.2, kde $A = \mathbb{R}$, $B = \langle 0, 1 \rangle$, $C = \langle 0, \infty \rangle$. Rezy načrtnuté na grafe funkcie sú práve funkcie z B do A priradené jednotlivým prvkom z C . (Naschvál som zvolil množiny A, B a C rôzne, aby sa na obrázku dalo vidieť, ktorá množina je ktorá.)

Opäť, priamo dosadením nám vyjde, že $\varphi \circ \psi$ aj $\psi \circ \varphi$ je identita. Počítajme najprv $\varphi \circ \psi: A^{B \times C} \rightarrow A^{B \times C}$. Pre ľubovoľné $g: B \times C \rightarrow A$ chceme zistiť, čomu sa rovná zobrazenie $\varphi(\psi(g)): B \times C \rightarrow A$. Dostaneme (priamo použitím definície zobrazení φ a ψ)

$$\varphi(\psi(g))(b, c) = \psi(g)(c)(b) = g(b, c).$$



Obr. 3.2: Obrázok ilustrujúci postup v dôkaze vety 3.2.24. (Použitá funkcia je $f(x, y) = \frac{3}{2} + \frac{1}{5} \sin \pi x$.)

Vyšlo nám, že $\varphi(\psi(g)) = g$ pre každé $g \in A^{B \times C}$, a teda $\varphi \circ \psi = id_{A^{B \times C}}$.

Skúsme teraz vyrátať $\psi \circ \varphi: (A^B)^C \rightarrow (A^B)^C$. Ak máme zobrazenie $f: C \rightarrow A^B$, chceme zistiť, či platí $\psi(\varphi(f)) = f$. Použitím definície φ a ψ máme

$$\psi(\varphi(f))(c)(b) = \varphi(f)(b, c) = f(c)(b).$$

Keďže táto rovnosť platí pre všetky $b \in B$, znamená to rovnosť zobrazení

$$\psi(\varphi(f))(c) = f(c).$$

Opäť, predchádzajúca rovnosť platí pre každé $c \in C$, teda $\psi \circ \varphi(f) = f$. Posledná rovnosť (ktorá platí pre ľubovoľné $f \in (A^B)^C$) znamená rovnosť zobrazení $\psi \circ \varphi = id_{(A^B)^C}$.

Zistili sme, že $\psi = \varphi^{-1}$, preto obe zobrazenia φ aj ψ sú bijekcie. $\square$

Môžeme si ukázať ešte jednu identitu týkajúcu sa umocňovania kardinálov, ktorá má o čosi jednoduchší dôkaz než predošlé tvrdenia. Stručne povedané, ide vlastne o to, že každé zobrazenie $C \rightarrow A \times B$ sa dá jednoznačne rozdeliť na dve „zložky“ – na zobrazenia $C \rightarrow A$ a $C \rightarrow B$. Pokúsime sa teraz dôkaz tohoto faktu aj formálne zapísať. (Urobíme to dokonca dvoma spôsobmi.)

Veta 3.2.25. *Pre ľubovoľné kardinálne čísla a, b, c platí*

$$(ab)^c = a^c \cdot b^c.$$

V dôkaze budeme používať nasledujúce funkcie, ktorým sa často hovorí projekcie. Ak máme karteziánsky súčin dvoch množín A a B , tak môžeme definovať zobrazenia $p_B: A \times B \rightarrow B$ predpisom

$$\begin{aligned} p_A(a, b) &= a \\ p_B(a, b) &= b \end{aligned}$$

Pre nás bude užitočná táto vlastnosť projekcií: Ak máme ľubovoľný prvok $x \in A \times B$, tak $(p_A(x), p_B(x)) = x$.

$$(\forall x \in A \times B)(p_A(x), p_B(x)) = x \quad (3.4)$$

Platnosť tejto podmienky sa overí vcelku ľahko. Skutočne, každý prvok z karteziánskeho súčinu $A \times B$ je tvaru $x = (a, b)$. Pre takúto usporiadanú dvojicu skutočne dostaneme

$$(p_A(x), p_B(x)) = (p_A(a, b), p_B(a, b)) = (a, b) = x.$$

Dôkaz. Chceme ukázať existenciu bijekcie medzi množinami $(A \times B)^C$ a $A^C \times B^C$. To by sa nám podarilo, ak by sme vedeli nájsť zobrazenia

$$\begin{aligned} \varphi: (A \times B)^C &\rightarrow A^C \times B^C \\ \psi: A^C \times B^C &\rightarrow (A \times B)^C \end{aligned}$$

a ukázať, že tieto zobrazenia sú navzájom inverzné.

Ak chceme zdefinovať zobrazenie φ , tak každej funkcii $f: C \rightarrow A \times B$ by sme mali priradiť dvojicu zobrazení, ktoré idú z C do A resp. z C do B . Všimnime si, aké zobrazenia máme k dispozícii.

$$\begin{array}{ccccc} & & C & & \\ & \swarrow & \downarrow f & \searrow & \\ A & \xleftarrow{p_A} & A \times B & \xrightarrow{p_B} & B \end{array}$$

Vidíme, že vieme dostať zobrazenia $p_A \circ f: C \rightarrow A$ a $p_B \circ f: C \rightarrow B$.

Môžeme teda zdefinovať

$$\varphi(f) = (p_A \circ f, p_B \circ f).$$

Obrátene, ak máme dvojicu zobrazení $g: C \rightarrow A$ a $h: C \rightarrow B$, chceli by sme im priradiť zobrazenie $\psi(g, h): C \rightarrow A \times B$. Vcelku prirodzený spôsob je urobiť to takto:

$$\psi(g, h)(c) = (g(c), h(c)).$$

Podobne ako v predošlých dôkazoch sme našli nejaké zobrazenia oboma smermi, stačí už iba overiť, či ψ je inverzné zobrazenie k φ .

Pozrime sa najprv na to, čo dostaneme zložením $\psi \circ \varphi$. Máme

$$\psi(\varphi(f)) = \psi(p_A \circ f, p_B \circ f).$$

chceme overiť, či zobrazenie vpravo je rovné zobrazeniu f . Pozrime sa na to, čo dostaneme dosadením ľubovoľného prvku $c \in C$:

$$\psi(\varphi(f))(c) = \psi(p_A \circ f, p_B \circ f)(c) = (p_A(f(c)), p_B(f(c))) \stackrel{(3.4)}{=} f(c).$$

V poslednom kroku sme využili platnosť (3.4).

Zistili sme, že

$$\psi \circ \varphi = id_{(A \times B)^C}.$$

Zostáva nám pozrieť sa na ich zloženie v opačnom poradí. Priamo z definície máme

$$\varphi(\psi(g, h)) = (p_A \circ \psi(g, h), p_B \circ \psi(g, h)).$$

Chceme overiť, či dvojica na pravej strane je rovná (g, h) t.j. či

$$\begin{aligned} p_A \circ \psi(g, h) &= g \\ p_B \circ \psi(g, h) &= h \end{aligned}$$

Rovnosť dvoch zobrazení môžeme overiť tak, že dosadíme ľubovoľný prvok $c \in C$. Skutočne dostaneme

$$\begin{aligned} p_A(\psi(g, h)(c)) &= p_A(g(c), h(c)) = g(c) \\ p_B(\psi(g, h)(c)) &= p_B(g(c), h(c)) = h(c) \end{aligned}$$

čo ukazuje uvedené rovnosti.

Platí teda aj

$$\varphi \circ \psi = id_{A^C \times B^C}.$$

Zistili sme, že ψ je inverzné zobrazenie k φ , čo znamená, že φ je bijekcia. $\square$

Skúsme ten istý dôkaz zapísať trochu inak. Nasledujúci dôkaz je vlastne totožný s dôkazom, ktorý sme uviedli, ale vyhli sme sa v ňom používaniu projekcií. Je na vás, aby ste si vybrali, ktorý dôkaz sa vám zdá zrozumiteľnejší. (Samozrejme, pozrieť si môžete oba dôkazy.)

Dôkaz. Chceme nájsť zobrazenia

$$\begin{aligned} \varphi: (A \times B)^C &\rightarrow A^C \times B^C \\ \psi: A^C \times B^C &\rightarrow (A \times B)^C \end{aligned}$$

také, že $\varphi \circ \psi$ aj $\psi \circ \varphi$ je identita.

Zobrazenie φ by malo ľubovoľnej funkcii $f: C \rightarrow A \times B$ priradiť nejakú dvojicu funkcií $\varphi(f) = (g, h)$, kde $g: C \rightarrow A$, $h: C \rightarrow B$.

Pre ľubovoľné $c \in C$ je $f(c)$ nejaká usporiadaná dvojica z $A \times B$, t.j. existujú (jednoznačne určené) prvky $a \in A$, $b \in B$ také, že $f(c) = (a, b)$. Takto vieme prvku $c \in C$ priradiť jednoznačne prvok $a \in A$ a tiež prvok $b \in B$. Čiže máme zobrazenia z C do A a z C do B , ktoré môžeme zobrať za $\varphi(f)$.

Voľbu zobrazení g a h môžeme stručne zapísať podmienkou

$$\varphi(f) = (g, h) \quad \Leftrightarrow \quad f(c) = (g(c), h(c)). \quad (3.5)$$

Ďalej chceme priradiť dvojici zobrazení $g: C \rightarrow A$, $h: C \rightarrow B$ nejaké zobrazenie $C \rightarrow A \times B$. Vcelku prirodzený spôsob (rovnaký ako v predošlom dôkaze) je

$$\psi(g, h)(c) = (g(c), h(c)).$$

Teraz chceme overiť, či $\psi(\varphi(f)) = f$. Vieme, že $\varphi(f) = (g, h)$ pre zobrazenia g, h jednoznačne určené podmienkou (3.5). Potom máme

$$\psi(\varphi(f))(c) = \psi(g, h)(c) = (g(c), h(c)) \stackrel{(3.5)}{=} f(c).$$

Táto rovnosť platí pre ľubovoľné $c \in C$, teda dostávame

$$\psi(\varphi(f)) = f.$$

Opäť z toho, že posledná uvedená rovnosť platí pre ľubovoľné $f: C \rightarrow A \times B$ dostávame

$$\psi \circ \varphi = id_{(A \times B)^C}.$$

Tiež nás zaujíma, či $\varphi(\psi(g, h)) = (g, h)$. Dvojica zobrazení $\varphi(\psi(g, h))$ je jednoznačne určená podmienkou (3.5), namiesto f však teraz máme dosadiť $\psi(g, h)$. Dostávame

$$\varphi(\psi(g, h)) = (g, h) \quad \Leftrightarrow \quad \psi(g, h)(c) = (g(c), h(c)),$$

čo platí priamo na základe definície zobrazenia ψ .

Z uvedenej rovnosti (a z toho, že platí pre ľubovoľné g, h) opäť dostaneme

$$\varphi \circ \psi = id_{A^C \times B^C}.$$

Zistili sme, že ψ je inverzné zobrazenie k φ , čo znamená, že φ je bijekcia. $\square$

Veta 3.2.26. *Pre ľubovoľné kardinálne čísla a, b platí*

$$a^b \leq 2^{ab}.$$

Dôkaz. Ak množiny A, B sú také, že $|A| = a$ a $|B| = b$, tak $A^B \subseteq \mathcal{P}(B \times A)$. (Vyplýva to priamo z definície zobrazenia.)

To ale znamená, že $|A^B| \leq |\mathcal{P}(B \times A)|$ a $a^b \leq 2^{ab}$. $\square$

Ak v predchádzajúcej vete položíme $b = 1$, tak dostaneme

Dôsledok 3.2.27. *Pre ľubovoľné kardinálne číslo a platí*

$$a \leq 2^a.$$

Môžete sa skúsiť zamyslieť nad tým, či by ste vedeli vymyslieť nejaký jednoduchý dôkaz dôsledku 3.2.27 a potom ukázať vetu 3.2.26 pomocou tohoto dôsledku a ďalších vecí, ktoré sme už ukázali.

Cvičenia

Úloha 3.2.1. Ukážte, že $|\mathbb{Z}| = \aleph_0$. (T.j. nájdite bijekciu medzi $\mathbb{Z}$ a $\mathbb{N}$.)

Úloha 3.2.2. Zdôvodnite, že pre ľubovoľné kardinálne číslo a platí:

$$0 + a = a$$

$$0 \cdot a = 0$$

$$1 \cdot a = a$$

$$2 \cdot a = a + a$$

Úloha 3.2.3. Ukážte, že $\mathfrak{c} \cdot \mathfrak{c} = \mathfrak{c}$ a $\mathfrak{c}^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$.

Úloha 3.2.4. Ukážte, že pre ľubovoľný konečný kardinál n platí $\mathfrak{c} = n \cdot \mathfrak{c} = \mathfrak{c} \cdot \mathfrak{c} = \mathfrak{c}^n = \mathfrak{c}^{\aleph_0}$.

Úloha 3.2.5. Ukážte, že pre ľubovoľný konečný kardinál n platí $2^{\aleph_0} = n^{\aleph_0} = \aleph_0^{\aleph_0} = \mathfrak{c}^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$.

Úloha 3.2.6. S využitím faktu, že pre nekonečné kardinály platí $b \cdot b = b$ (poznámka 3.2.18) ukážte, že ak $2 < a \leq b$, kde a, b sú nekonečné kardinály, tak $2^b = a^b$.

Úloha 3.2.7. Ukážte priamo z definície (t.j. konštrukciou bijekcie resp. injekcie), že:

a) Ak $|A| = |B|$, tak $|\mathcal{P}(A)| = |\mathcal{P}(B)|$.

b) Ak $|A| \leq |B|$, tak $|\mathcal{P}(A)| \leq |\mathcal{P}(B)|$.

Úloha 3.2.8. Dokážte dôsledok 3.2.27 bez toho, aby ste sa odvolávali na vetu 3.2.26. Ukážte, ako potom možno z uvedeného dôsledku odvodiť vetu 3.2.26.

Úloha 3.2.9. Ukážte, že ak pre množiny A, B platí $|A \setminus B| = |B \setminus A|$, tak $|A| = |B|$.

Úloha 3.2.10*. Aká je kardinalita množiny všetkých bijekcií z $\mathbb{N}$ do $\mathbb{N}$? (Bijekcie z $\mathbb{N}$ do $\mathbb{N}$ sa niekedy zvyknú nazývať aj permutáciami množiny $\mathbb{N}$. Na základe analógie s prirodzenými číslami by sme kardinalitu takejto množiny mohli nazvať $\aleph_0$ -faktoriál.)

3.3 Cantorova veta a diagonálna metóda

Veta 3.3.1 (Cantor). *Pre každú množinu X platí $|X| < |\mathcal{P}(X)|$.*

Cantorovu vetu môžeme ekvivalentne preformulovať tak, že pre každé kardinálne číslo a platí

$$a < 2^a.$$

Dôkaz. Nerovnosť $|X| \leq |\mathcal{P}(X)|$ vyplýva z toho, že $x \mapsto \{x\}$ je injekcia z X do $\mathcal{P}(X)$. (Iné možné zdôvodnenie – dôsledok 3.2.27).

Predpokladajme teraz, že by existovala bijekcia $f: X \rightarrow \mathcal{P}(X)$. Ďalej označme

$$A := \{x \in X; x \notin f(x)\}.$$

Pretože f je bijekcia, existuje $y \in X$ s vlastnosťou $A = f(y)$.

Sú dve možnosti. Buď platí $y \in A$, čo ale znamená, že $y \notin f(y) = A$; alebo platí $y \notin A$ a v tomto prípade $y \in f(y) = A$. Obidve možnosti vedú k sporu a teda nemôže existovať bijekcia medzi X a $\mathcal{P}(X)$. $\square$

Príklad 3.3.2. Možno nám lepšie pomôže pochopiť tento dôkaz, ak si ho ešte raz osvetlíme na prípade $X = \mathbb{N}$. Budeme sa teda zaoberať kardinalitou množiny $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, namiesto nej však môžeme zobrať množinu $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ všetkých postupností núl a jednotiek. Vo vete 3.2.7 sme totiž skonštruovali bijekciu $A \mapsto \chi_A$ medzi týmito dvoma množinami.

Chceme ukázať, že $|\{0, 1\}^{\mathbb{N}}| \neq \aleph_0$. Postupujme sporom – predpokladajme, že by existovala bijekcia $f: \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Máme teda postupnosti prirodzených čísel

$$\begin{aligned} f(0) &= (a_0^{(0)}, a_1^{(0)}, a_2^{(0)}, \dots) \\ f(1) &= (a_0^{(1)}, a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, \dots) \\ f(2) &= (a_0^{(2)}, a_1^{(2)}, a_2^{(2)}, \dots) \\ &\vdots \end{aligned}$$

Ak definujeme postupnosť $b = (b_n)_{n=0}^{\infty}$ ako

$$b_n = 1 - a_n^{(n)},$$

čiže b_n je 0 ak $a_n^{(n)} = 1$ a obrátene, tak potom b nie je rovné žiadnej z postupností $f(n)$, $n \in \mathbb{N}$. Od postupnosti $f(n)$ sa totiž líši na n -tom mieste.

Dôkaz vety 3.3.1 je v podstate totožný s postupom z predchádzajúceho príkladu. (Jediný rozdiel je v tom, že sme nemohli prvky $f(x)$, $x \in X$, zapísať do postupnosti, keďže tam sme pracovali s ľubovoľnou množinou X a nie s množinou $\mathbb{N}$.)

Poznámka 3.3.3. Metóda použitá v predchádzajúcom dôkaze pochádza od Cantora a nazýva sa *diagonálna metóda*. (V predchádzajúcom príklade vidno, že sme vlastne menili diagonálne prvky.) Podobný argument je používaný často, aj v iných oblastiach matematiky. Mohli ste sa s ním stretnúť napríklad aj na predmete formálne jazyky a automaty, pri dôkaze, že existujú jazyky, ktoré nie sú rozpoznateľné žiadnym Turingovým strojom [RF, Kapitola 6], [HMu, Chapter 9] (voľne povedané, nie všetko sa dá naprogramovať).

My si ukážeme ešte jednu aplikáciu tejto metódy v príklade 3.5.5.

Môžeme si všimnúť, že na základe Cantorovej vety dostávame nekonečnú hierarchiu kardinálnych čísel. (Pre každé kardinálne číslo existuje kardinál, ktorý je od neho väčší.)

Príklad 3.3.4. Ukážeme, že platí

$$\aleph_0 \cdot \mathfrak{c} = \mathfrak{c}.$$

Z Cantorovej vety máme $\aleph_0 < 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$. Na základe toho dostaneme nerovnosť

$$\aleph_0 \cdot \mathfrak{c} \leq \mathfrak{c} \cdot \mathfrak{c} = 2^{\aleph_0} \cdot 2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 + \aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}.$$

Platí aj nerovnosť $\mathfrak{c} \leq \aleph_0 \cdot \mathfrak{c}$, takže z Cantor-Bernsteinovej vety dostaneme dokazovanú rovnosť.

Cvičenia

Úloha 3.3.1. Ukážte, že $\mathfrak{c}^{\mathfrak{c}} = 2^{\mathfrak{c}}$.

3.4 Spočítateľné a nespočítateľné množiny

Definícia 3.4.1. Ak pre množinu A platí $|A| \leq \aleph_0$, tak hovoríme, že A je *spočítateľná*. Spočítateľná množina môže byť buď *konečná spočítateľná* množina, ak $|A| < \aleph_0$, alebo *nekonečná spočítateľná*, ak $|A| = \aleph_0$.

Ak pre množinu A platí $|A| > \aleph_0$, tak A je nespočítateľná.

Opäť platí rovnaká poznámka, ako pri konečných množinách. Ak nespočítateľné množiny definujeme takýmto spôsobom, je to síce to isté ako povedať, že sú to tie množiny, ktoré nie sú spočítateľné, dôkaz tohoto faktu by si však vyžiadal použitie axiómy výberu (pozri poznámku 3.1.9).

Ukážeme, že spočítateľné zjednotenie spočítateľných množín je opäť spočítateľná množina. Dôkaz tohoto faktu súvisí s dôkazom existencie bijekcie medzi $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ a $\mathbb{N}$ (pozri príklad 3.2.17). Je rozumné zdôrazniť, že v tomto dôkaze využijeme axiómu výberu. (Bijekciu medzi $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ a $\mathbb{N}$ sme popísali presným predpisom, čiže tam sme axiómu výberu nepotrebovali.)

Veta 3.4.2. *Nech I je spočítateľná množina a A_i je spočítateľná množina pre každé $i \in I$. (T.j. $\{A_i; i \in I\}$ je spočítateľný systém spočítateľných množín.) Potom aj množina $\bigcup_{i \in I} A_i$ je spočítateľná.*

Dôkaz. Predpokladáme, že $|I| \leq \aleph_0$ a $|A_i| \leq \aleph_0$. Teda existuje injekcia $f: I \rightarrow \mathbb{N}$ a pre každé $i \in I$ môžeme vybrať nejakú injekciu $f_i: A_i \rightarrow \mathbb{N}$. (Na tomto mieste využívame axiómu výberu.)

Pomocou zobrazení f a f_i , $i \in I$, zdefinujeme injekciu z $\bigcup_{i \in I} A_i$ do $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Nech $a \in \bigcup_{i \in I} A_i$.

To znamená, že existuje aspoň jedno $i \in I$ také, že $a \in A_i$. Ako i_a označme také $i \in I$, pre ktoré platí $a \in A_i$ a súčasne $f(i)$ je minimálne. (Tu využívame fakt, že každá neprázdna podmnožina $\mathbb{N}$ má najmenší prvok.) Teraz definujeme $g: \bigcup_{i \in I} A_i \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ ako

$$g(a) = (f(i_a), f_{i_a}(a)).$$

Toto zobrazenie je injektívne. Ak totiž $g(a) = g(b)$, tak a aj b patria do tej istej množiny A_{i_a} (lebo $f(i_a) = f(i_b)$ a f je injektívne). Potom platí $f_{i_a}(a) = f_{i_a}(b)$ a z injektívnosti zobrazenia f_{i_a} máme $a = b$.

Ukázali sme existenciu injekcie $g: \bigcup_{i \in I} A_i \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Ak ju zložíme s ľubovoľnou bijekciou $h: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ (dve také bijekcie sme zostrojili v príklade 3.2.17), tak dostaneme injekciu z $\bigcup_{i \in I} A_i$ do $\mathbb{N}$. To znamená, že $|\bigcup_{i \in I} A_i| \leq \aleph_0$ a množina $\bigcup_{i \in I} A_i$ je spočítateľná. $\square$

Tvrdenie 3.4.3. *Množina $\mathbb{Q}$ všetkých racionálnych čísel je nekonečná spočítateľná, t.j.*

$$|\mathbb{Q}| = \aleph_0.$$

Dôkaz. Pretože $\mathbb{N} \subseteq \mathbb{Q}$, platí $\aleph_0 \leq |\mathbb{Q}|$.

Súčasne každé racionálne číslo vieme zapísať jednoznačne v tvare $\frac{p}{q}$, kde $p, q \in \mathbb{Z}$, $q > 0$ a čísla p, q sú nesúdeliteľné. Máme teda injekciu z $\mathbb{Q}$ do $\mathbb{N} \times \mathbb{Z}$, a o tejto množine už vieme, že má kardinalitu $\aleph_0$ ($|\mathbb{N} \times \mathbb{Z}| = |\mathbb{N}| \cdot |\mathbb{Z}| = \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$, pozri príklad 3.2.17). Dostávame teda aj druhú nerovnosť $|\mathbb{Q}| \leq \aleph_0$.

Na základe Cantor-Bernsteinovej vety potom máme $|\mathbb{Q}| = \aleph_0$. $\square$

Spočítateľnosť množiny $\mathbb{Q}$ by sme mohli dokázať aj pomocou vety 3.4.2 (rozmyslite si ako). Výhoda dôkazu, ktorý sme uviedli, je v tom, že nevyužíva axiómu výberu.

Pod intervalom v $\mathbb{R}$ budeme rozumieť akúkoľvek množinu I s vlastnosťou

$$a \in I \wedge b \in I \wedge a < x < b \quad \Rightarrow \quad x \in I.$$

Tejto definícii vyhovujú aj jednoprvkové množiny, ktoré sa zvyknú nazývať *degenerované* alebo *triviálne* intervaly. Všetky netriviálne intervaly sú tvaru (a, b) , $\langle a, b \rangle$, $\langle a, b \rangle$, (a, b) , $(-\infty, a)$, $(-\infty, a]$, $\langle a, \infty \rangle$ alebo (a, ∞) pre nejaké $a, b \in \mathbb{R}$.

Tvrdenie 3.4.4. *Ak A je nejaká množina disjunktných netriviálnych intervalov na $\mathbb{R}$, tak množina A je spočítateľná.*

Dôkaz. Každý netriviálny interval obsahuje nejaké racionálne číslo. (Medzi ľubovoľnými dvoma rôznymi reálnymi číslami sa nachádza racionálne číslo.) Ak intervalu $I \in A$ priradíme nejaké racionálne číslo $q_I \in I$, dostaneme injekciu z A do $\mathbb{Q}$. Keďže množina $\mathbb{Q}$ je spočítateľná, musí potom byť spočítateľná aj množina A . $\square$

V predchádzajúcom dôkaze sme použili axiómu výberu na to, aby sme pre každé $I \in A$ vybrali nejaké racionálne číslo $q_I \in I \cap \mathbb{Q}$. Použitiu axiómy výberu sa dá v tomto dôkaze veľmi ľahko vyhnúť. Stačí si všimnúť, že v predchádzajúcom dôkaze sme explicitne popísali injektívne zobrazenie $i: \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Vieme tiež, že existuje bijekcia medzi $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ a $\mathbb{N}$. Takže v konečnom dôsledku môžeme nájsť injekciu $\mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{N}$ a teda každej podmnožine $\mathbb{Q}$ priradiť zodpovedajúcu podmnožinu množiny $\mathbb{N}$. Zostáva už len využiť to, že každá neprázdna podmnožina množiny prirodzených čísel má najmenší prvok, čiže vieme z nej explicitným predpisom jeden prvok „vybrať“.

Cvičenia

Úloha 3.4.1. Ukážte, že ak pre kardinálne číslo a platí $a \cdot \aleph_0 = a$, tak $2^a = \aleph_0^a$.

Úloha 3.4.2. Ukážte, že ak A je spočítateľná množina, B je nespočítateľná množina a $A \subseteq B$, tak $|B \setminus A| = |B|$. (V tejto úlohe se môže hodiť použitie faktu, že pre každú množinu platí buď $|X| < \aleph_0$ alebo $|X| \geq \aleph_0$, ktorý sme zatiaľ nedokázali. Bez toho, aby sme sa odvolávali na doteraz nedokázané veci vieme dokázať, že z $|B| > \aleph_0$, $|A| \leq \aleph_0$ a $|B \setminus A| \geq \aleph_0$ vyplýva $|B| = |B \setminus A|$.)

Úloha 3.4.3. Ukážte, že množina všetkých konečných podmnožín $\mathbb{N}$ je spočítateľná. (Návod: Jedna z možností je ukázať, že množina n -prvkových množín je spočítateľná pre každé prirodzené číslo n a použiť vetu 3.4.2.)

Úloha 3.4.4. Ukážte, že množina všetkých zobrazení z $\mathbb{Q}$ do $\mathbb{Q}$ nie je spočítateľná. (Môžete vyskúšať použiť diagonálnu metódu aj priamy výpočet kardinality tejto množiny.)

Úloha 3.4.5. Postupnosť (a_n) čísel sa volá *takmer stacionárna*, ak $(\exists m \in \mathbb{N})(\forall n \geq m)a_n = a_m$. Inými slovami, od určitého čísla m sú už všetky členy tejto postupnosti rovnaké.

Dokážte, že:

- a) množina všetkých takmer stacionárnych postupností čísel 0, 1 je nekonečná spočítateľná;
- b) množina všetkých takmer stacionárnych postupností prirodzených čísel je nekonečná spočítateľná;
- c) množina všetkých takmer stacionárnych postupností reálnych čísel má kardinalitu $\mathfrak{c}$.

Úloha 3.4.6*. Existuje nespočítateľný reťazec v $(\mathcal{P}(\mathbb{N}), \subseteq)$? (T.j. existuje taký systém $\mathcal{S}$ podmnožín $\mathbb{N}$, ktorý je nespočítateľný a pre ľubovoľné $A, B \in \mathcal{S}$ platí $A \subseteq B$ alebo $B \subseteq A$?)

Úloha 3.4.7. Nech $S = \mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$. Ukážte, že existujú množiny V, H také, že $S = V \cup H$, prienik V sa každou vertikálnou priamkou v rovine $\mathbb{R}^2$ je konečný a prienik H sa každou horizontálnou priamkou je konečný. (T.j. pre každé $x \in \mathbb{Q}$ sú množiny $\{y \in \mathbb{Q}; (x, y) \in V\} = \{x\} \times \mathbb{Q} \cap V$ aj $\{y \in \mathbb{Q}; (y, x) \in H\} = \mathbb{Q} \times \{x\} \cap H$ konečné.)

Úloha 3.4.8. Ak A je nekonečná množina (t.j. $|A| \geq \aleph_0$), tak existuje rozklad $A = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i$ na spočítateľne veľa disjunktných množín taký, že žiadne dve rôzne množiny nemajú rovnakú kardinalitu.

Úloha 3.4.9. Nech A je množina po dvoch disjunktných kruhov v $\mathbb{R}^2$. Ukážte, že A je spočítateľná. Platí to aj pre kružnice?

Úloha 3.4.10. Ukážte, že ak $I_n = \langle a_n, b_n \rangle$ je klesajúca postupnosť uzavretých intervalov (t.j. $I_{n+1} \subseteq I_n$ pre každé $n \in \mathbb{N}$), tak $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} I_n \neq \emptyset$. (Tento výsledok by ste mohli poznať z analýzy pod *Cantorova veta*, možno v trochu všeobecnejšom znení – pre kompaktné ohraničené množiny.)

Vedeli by ste pomocou tohoto výsledku dokázať (diagonálnou metódou), že množina $\langle 0, 1 \rangle$ je nespočítateľná? (Hint: Skúste začať tým, že interval $\langle 0, 1 \rangle$ rozdelíte na 3 uzavreté intervaly $\langle 0, 1/3 \rangle$, $\langle 1/3, 2/3 \rangle$, $\langle 2/3, 1 \rangle$.)

Úloha 3.4.11. Nech $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ je funkcia taká, že pre každé $x \in \mathbb{R}$ platí $f(f(x)) = x$. Dokážte, že existuje iracionálne číslo, ktoré sa funkciou f zobrazí na iracionálne číslo.

3.5 Mohutnosť niektorých v praxi sa vyskytujúcich množín

V predchádzajúcej podkapitole sme skúmali kardinalitu niektorých množín, väčšinou takých, že mali kardinalitu $\aleph_0$. V tejto časti sa budeme venovať ďalším množinám, ktoré sa vyskytujú v matematickej praxi. Množiny, ktoré budeme skúmať v tejto časti, budú zväčša nespočítateľné a budú mať kardinalitu $\mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$.

Ako prvý výsledok si ukážeme veľmi dôležitý fakt, že kardinalita množiny reálnych čísel je $\mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$.

Na úvod si všimnime, že $|(0, 1)| = |\langle 0, 1 \rangle| = |\langle 0, 1 \rangle| = |\mathbb{R}|$.

Keďže $(0, 1) \subseteq \langle 0, 1 \rangle \subseteq \langle 0, 1 \rangle \subseteq \mathbb{R}$, máme nerovnosti

$$|(0, 1)| \leq |\langle 0, 1 \rangle| \leq |\langle 0, 1 \rangle| \leq |\mathbb{R}|.$$

Ak nájdeme bijekciu medzi $(0, 1)$ a $\mathbb{R}$, tak túto nerovnosť môžeme rozšíriť na

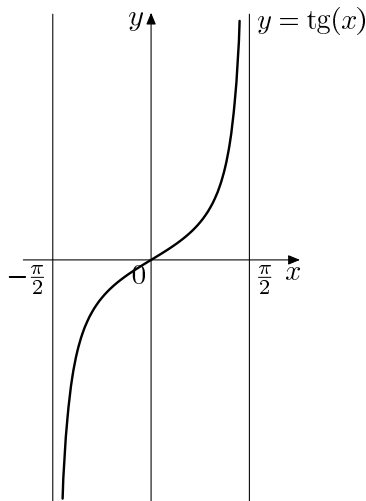
$$|\mathbb{R}| = |(0, 1)| \leq |\langle 0, 1 \rangle| \leq |\langle 0, 1 \rangle| \leq |\mathbb{R}|$$

a z Cantor-Bernsteinovej vety potom dostaneme, že všetky uvedené množiny majú rovnakú kardinalitu.

Takýchto bijekcií možno nájsť veľa. Jedna z nich je $f: (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$

$$f(x) = \operatorname{tg}\left(\frac{x}{\pi} + \frac{1}{2}\right).$$

(Dostali sme ju vhodným posunutím a preškálovaním funkcie tangens – pozri obrázok 3.5).



Obr. 3.3: Bijekcia medzi $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ a $\mathbb{R}$

Ak by ste chceli použiť nejakú elementárnejšiu funkciu, môžete skúsiť vhodne upraviť funkcie z obrázkov 3.4 a 3.5, ktoré sú navzájom inverzné.

Určite by ste ľahko našli bijekciu medzi $(0, 1)$ a ľubovoľným otvoreným intervalom, medzi $\langle 0, 1 \rangle$ a ľubovoľným uzavretým intervalom.

Teda namiesto rovnosti $|\mathbb{R}| = \mathfrak{c}$ môžeme dokázať rovnakú rovnosť pre kardinalitu nejakého uzavretého, polouzavretého alebo otvoreného intervalu.

Predtým, než sa dostaneme k vlastnému dôkazu, povieme si ešte niečo o *binárnom* (*dyadickom*) zápise reálnych čísel. Je to vlastne rozšírenie zápisu v dvojkovej sústave, ktorý z predmetu Elementárna teória čísel [Č] poznáte pre prirodzené čísla. Pre reálne čísla túto konštrukciu možno poznáte z prvého analyzy [VN, Kapitola V.8].

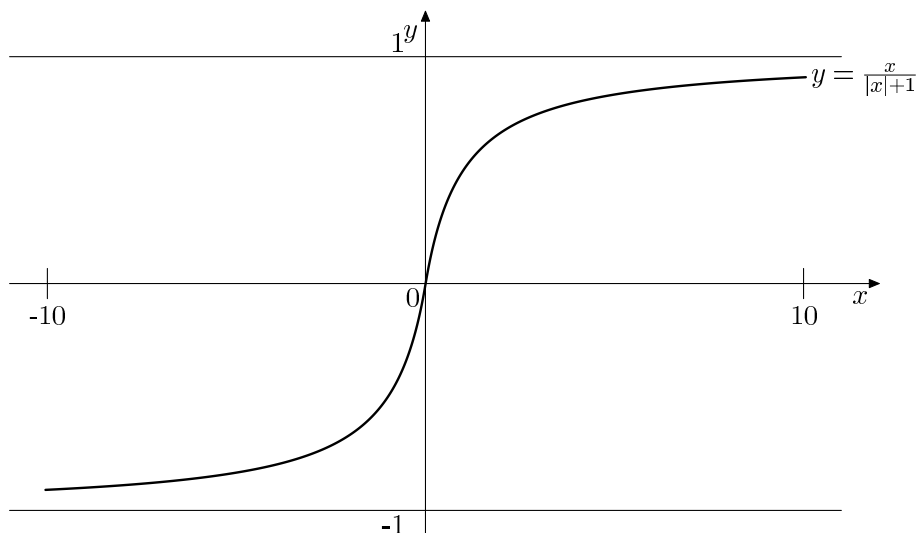
Budú nás zaujímať len reálne čísla z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, preto sa binárnemu zápisu budeme venovať iba pre tieto čísla.

Ak $(a_n)_{n=0}^{\infty}$ je ľubovoľná postupnosť núl a jednotiek, t.j. $(a_n)_{n=0}^{\infty} \in \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$, tak takejto postupnosti priradíme číslo

$$r = \frac{a_0}{2} + \frac{a_1}{2^2} + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{2^{n+1}}.$$

Očividne platí $0 \leq r \leq \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^{n+1}} = 1$, čiže takto dostaneme nejaké číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Čísla a_n budeme volať *cífrý* binárneho zápisu reálneho čísla r .

Poznámka 3.5.1. Keď sa zamyslíte nad týmto zápisom, azda je vidieť, že ak by sme v menovateli všade použili 10 namiesto 2, bol by to presne zápis v desiatkovej sústave na aký

Obr. 3.4: Bijekcia medzi $\mathbb{R}$ a $(-1, 1)$

ste zvyknutí – s tým rozdielom, že vtedy by sme namiesto $a_n \in \{0, 1\}$ potrebovali pripustiť $a_n \in \{0, 1, \dots, 9\}$.

Podobne to funguje ak by sme ako základ zvolili nejaké iné prirodzené číslo $b \geq 2$. Tu používame $b = 2$, čo je najjednoduchší prípad. Možnosť $b = 10$ je zasa výhodná v tom, že ste sa s ňou stretávali už od základnej školy.

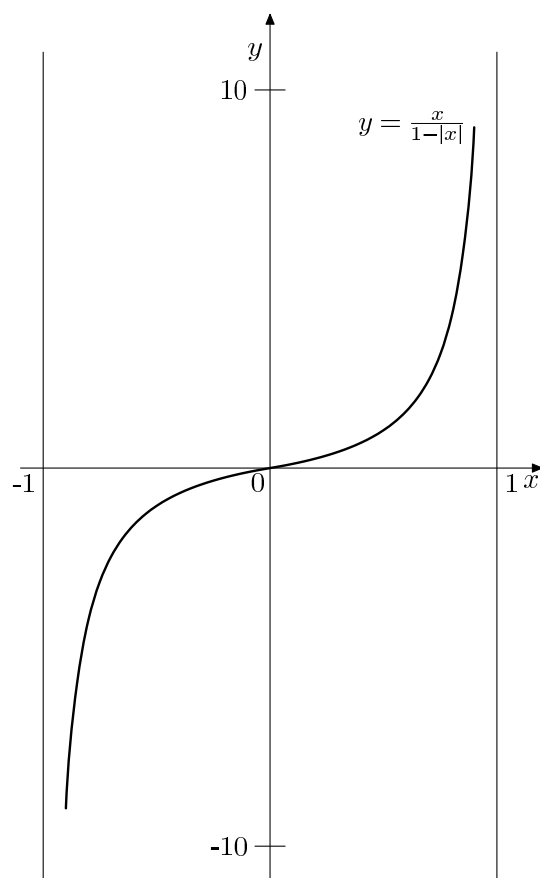
Musíme sa však ešte zamyslieť nad dvoma dôležitými otázkami: Dá sa takto zapísať každé číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$? Je takýto zápis reálnych čísel jednoznačný?

O tom, že takýto zápis existuje pre každé reálne číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ by nás mohla presvedčiť nasledujúca úvaha. Rozdelíme interval $\langle 0, 1 \rangle$ na dve rovnaké polovice: $\langle 0, \frac{1}{2} \rangle$ a $\langle \frac{1}{2}, 1 \rangle$. Číslo r určite patrí do niektorého z týchto intervalov, jeho krajné body označme l_0 a r_0 . Platí teda $l_0 \leq r < r_0$. Pritom číslo l_0 je tvaru $\frac{a_0}{2}$, kde $a_0 \in \{0, 1\}$, a platí $r_0 - l_0 = \frac{1}{2}$.

V druhom kroku rozdelíme interval $\langle l_0, r_0 \rangle$ opäť na dve rovnaké časti. Číslo r patrí do niektorého z intervalov $\langle l_0, \frac{l_0+r_0}{2} \rangle$ a $\langle \frac{l_0+r_0}{2}, r_0 \rangle$. Koncové body intervalu obsahujúceho r označíme ako l_1, r_1 a opäť si všimneme, že $l_1 = \frac{a_0}{2} + \frac{a_1}{2^2}$ pre nejaké $a_0, a_1 \in \{0, 1\}$, a $r_1 - l_1 = \frac{1}{2^2}$.

Indukciou môžeme analogicky postupovať ďalej. V indukčnom kroku máme čísla l_n a r_n také, že $r \in \langle l_n, r_n \rangle$, $l_n = \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{2^{i+1}}$ pre nejaké $a_0, \dots, a_n \in \{0, 1\}$ a $r_n - l_n = \frac{1}{2^{n+1}}$. Opäť platí, že r patrí do niektorého z intervalov $\langle l_n, \frac{l_n+r_n}{2} \rangle$ a $\langle \frac{l_n+r_n}{2}, r_n \rangle$ dĺžky $\frac{1}{2^{n+2}}$. Tento interval si označíme $\langle l_{n+1}, r_{n+1} \rangle$. Očividne platí $l_{n+1} = l_n$ alebo $l_{n+1} = l_n + \frac{1}{2^{n+2}}$, teda číslo l_{n+1} je tvaru $\sum_{i=0}^{n+1} \frac{a_i}{2^{i+1}}$ pre nejaké $a_0, \dots, a_{n+1} \in \{0, 1\}$, pričom $a_0, \dots, a_n$ sú tie isté čísla, ktoré určovali číslo l_n .

Indukciou takto zostrojíme postupnosti $(a_n)_{n=0}^\infty$, $(l_n)_{n=0}^\infty$ a $(r_n)_{n=0}^\infty$ také, že pre všetky

Obr. 3.5: Bijekcia medzi $(-1, 1)$ a $\mathbb{R}$

$n \in \mathbb{N}$ platí

$$0 \leq l_n \leq r < r_n \leq 1$$

$$r_n - l_n = \frac{1}{2^{n+1}}$$

$$l_n = \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{2^{i+1}}$$

$$a_n \in \{0, 1\}$$

Z uvedených vlastností je zrejmé, že obe postupnosti l_n aj r_n konvergujú k číslu r . To znamená, že r je limita postupnosti čiastočných súčtov radu $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{a_i}{2^{i+1}}$, čo je len iné vyjadrenie rovnosti

$$r = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{a_i}{2^{i+1}}.$$

Vidíme teda, že každé číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ má binárny rozvoj. Tento rozvoj však nemusí

byť jednoznačný. Napríklad číslo

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots$$

sa dá dostať pomocou dvoch rôznych postupností $(1, 0, 0, \dots)$ a $(0, 1, 1, \dots)$ z $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Podobným spôsobom vieme dostať dva rôzne rozvoje pre každé, ktoré sa dá binárne zapísať pomocou konečného počtu jednotiek. Stačí, keď posledné číslo tvaru $\frac{1}{2^{n+1}}$, $n \in \mathbb{N}$, ktoré sa vyskytuje v tomto zápise, nahradíme súčtom $\sum_{k=n+2}^{\infty} \frac{1}{2^k}$.

Ukážeme si, že toto je jediný prípad, kedy dochádza k nejednoznačnosti. Inými slovami, ak zakážeme konečné binárne rozvoje, tak pre každé číslo z intervalu $(0, 1)$ budeme už mať jediný rozvoj. To isté platí, ak zakážeme také rozvoje, ktoré počnúc od istého miesta už pozostávajú len zo samých jednotiek.

Predpokladajme, že platí

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{2^{k+1}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{b_k}{2^{k+1}},$$

pričom postupnosti $(a_n)_{n=0}^{\infty}, (b_n)_{n=0}^{\infty} \in \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ sa nerovnajú. Nech n_0 je prvý index, na ktorom sa tieto postupnosti líšia. Bez ujmy na všeobecnosti, nech $a_{n_0} = 1$ a $b_{n_0} = 0$. Označme

$$A = \sum_{k=n_0}^{\infty} \frac{a_k}{2^{k+1}}$$

$$B = \sum_{k=n_0}^{\infty} \frac{b_k}{2^{k+1}} = \sum_{k=n_0+1}^{\infty} \frac{b_k}{2^{k+1}}$$

Vieme, že platí $A = B$. Súčasne však $B \leq \sum_{k=n_0+1}^{\infty} \frac{1}{2^{k+1}} = \frac{1}{2^{n_0+1}}$, pričom rovnosť nastane jedine v prípade, že $b_{n_0+1} = b_{n_0+2} = \dots = 1$. Súčasne platí $A \geq \frac{1}{2^{n_0+1}}$ a rovnosť nastane jedine pre $a_{n_0} = 1$ a $a_{n_0+1} = a_{n_0+2} = \dots = 0$. Teda ide skutočne presne o taký prípad, aký sme pred chvíľou popísali.

Z toho, čo sme doteraz uviedli, je zrejmé, že existuje bijekcia medzi číslami z intervalu $(0, 1)$ a postupnosťami núl a jednotiek s výnimkou tých, ktoré označujú len konečne veľa jednotiek. Vieme, že všetkých postupností núl a jednotiek je $|\{0, 1\}^{\mathbb{N}}| = 2^{\aleph_0}$. Množina Y tých postupností, ktoré sú od istého miesta nulové, nám určuje *konečné* dyadické zápisy a každé číslo s konečným zápisom v dvojkovej sústave je racionálne. Máme teda injekciu z Y do $\mathbb{Q}$, čo znamená, že $|Y| \leq \aleph_0$. Celkom ľahko vidíme aj to, že platí aj rovnosť $|Y| = \aleph_0$. (Nerovnosť $|Y| \geq \aleph_0$ je zrejmá.)

Ak si označíme $X = \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$, tak máme $|X| = |X \setminus Y| + |Y| = |X \setminus Y|$ vďaka nerovnosti $|X \setminus Y| \geq \aleph_0$ (využívame tvrdenie 3.2.13). Z toho zistíme, že $|(0, 1)| = |X \setminus Y| = |X| = 2^{\aleph_0}$.

Už sme videli, že $\mathbb{R}$ má rovnakú kardinalitu ako ľubovoľný interval, dostávame teda

Tvrdenie 3.5.2.

$$|(0, 1)| = |\langle 0, 1 \rangle| = |\mathbb{R}| = 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$$

To isté platí aj pre ľubovoľné intervaly tvaru (a, b) , $\langle a, b \rangle$, (a, b) či $\langle a, b \rangle$.

V dôkaze sme používali Cantor-Bernsteinovu vetu, môžete sa pokúsiť nájsť priamo bijekcie medzi množinami $(0, 1)$, $(0, 1]$, $[0, 1)$, $[0, 1]$ a $\mathbb{R}$. Je veľa spôsobov, ako sa to dá urobiť, ku niektorým možnostiam by vás mohli inšpirovať obrázky 3.6 či 3.7.

Príklad 3.5.3. Skúsme sa ešte raz pozrieť na dyadické rozvoje reálnych čísel, ktoré sme použili v dôkaze tvrdenia 3.5.2, na konkrétnom príklade. (Snáď tento príklad pomôže objasniť, že sa to naozaj podobá na rozvoj v desiatkovej sústave, na ktorý sme zvyknutí.)

Lahko môžeme skontrolovať, že jeho súčet je skutočne

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} = \frac{2}{3}.$$

Tvrdenie 3.5.4. *Kardinalita množiny všetkých spojitých zobrazení z $\mathbb{R}$ do $\mathbb{R}$ je $\mathfrak{c}$.*

Tento fakt do istej miery kontrastuje s tým, že všetkých zobrazení z $\mathbb{R}$ do $\mathbb{R}$ je $\mathfrak{c}^{\mathfrak{c}} = 2^{\mathfrak{c}} > \mathfrak{c}$ (pozri úlohu 3.3.1). Dá sa teda povedať, že nespojitých zobrazení je oveľa viac ako spojitých.

Dôkaz. Stačí si uvedomiť, že ak vieme aké hodnoty nadobúda spojitý zobrazenie $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ na racionálnych číslach, tak tým je už toto zobrazenie jednoznačne určené. (Racionálne čísla tvoria hustú podmnožinu reálnych čísel, pre každé reálne číslo existuje postupnosť racionálnych čísel, ktorá k nemu konverguje.) Máme teda injekciu medzi spojitými zobrazeniami z $\mathbb{R}$ do $\mathbb{R}$ a ľubovoľnými zobrazeniami z $\mathbb{Q}$ do $\mathbb{R}$ určenú predpisom $f \mapsto f|_{\mathbb{Q}}$. Kardinalita množiny zobrazení z $\mathbb{Q}$ do $\mathbb{R}$ je

$$|\mathbb{R}|^{|\mathbb{Q}|} = \mathfrak{c}^{\aleph_0} = (2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 \cdot \aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}.$$

Teda spojitých zobrazení z $\mathbb{R}$ do $\mathbb{R}$ je nanajvýš $2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$.

Ak si teraz všimneme, že pre každé $a \in \mathbb{R}$ máme spojitú funkciu $f_a(x) = x + a$, tak vidíme, že hľadaná kardinalita je aspoň $|\mathbb{R}| = \mathfrak{c}$. $\square$

Príklad 3.5.5. Síce už vieme, že $|\mathbb{R}| = |\langle 0, 1 \rangle| = \mathfrak{c}$, a teda tieto množiny sú nespočítateľné, na tomto mieste môžeme však využiť desiatkový rozvoj reálnych čísel na to, aby sme si tento fakt ukázali použitím Cantorovej diagonálnej metódy (poznámka 3.3.3). Postup je veľmi podobný ako v príklade 3.3.2.

Ukážeme, že množina $\langle 0, 1 \rangle$ je nespočítateľná. Vieme, že každé číslo z tejto množiny sa dá jediným spôsobom zapísať v tvare $x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k}{10^{k+1}}$ a navyše ak vylúčime konečné rozvoje (t.j. také, kde sú od istého miesta všetky čísla nulové), tak je tento rozvoj jednoznačný. Desiatkový zápis budeme zapisovať v tvare $0.a_0a_1a_2\dots$ (Môžete sa pokúsiť sami si overiť existenciu a jednoznačnosť takéhoto zápisu – postup je podobný ako v prípade dyadického zápisu. Všeobecnejšie tvrdenie, hovoriace o rozvoji pri ľubovoľnom základe, nájdete napríklad v [ŠHHK, kapitola 3.6].)

Predpokladajme, že interval $\langle 0, 1 \rangle$ je spočítateľný. To znamená, že existuje bijekcia $f: \mathbb{N} \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$. Každé z čísel $f(0), f(1), f(2), \dots \in \langle 0, 1 \rangle$ sa dá zapísať pomocou desiatkového zápisu

$$\begin{aligned} f(0) &= 0.a_0^{(0)}a_1^{(0)}a_2^{(0)}\dots \\ f(1) &= 0.a_0^{(1)}a_1^{(1)}a_2^{(1)}\dots \\ f(2) &= 0.a_0^{(2)}a_1^{(2)}a_2^{(2)}\dots \\ &\vdots \end{aligned}$$

Pomocou týchto desatinných zápisov zdefinujeme nové číslo

$$b = 0.b_0b_1b_2\dots$$

tak, že $b_k \neq a_k^{(k)}$ a súčasne $b_k \neq 0$. Môžeme napríklad položiť $b_k = a_k^{(k)} + 1$ ak $a_k^{(k)} < 9$ a $b_k = 8$ ak $a_k^{(k)} = 9$. Číslo, ktoré sme takto dostali má nekonečný zápis v desiatkovej sústave rôzny od všetkých čísel $f(n)$, $n \in \mathbb{N}$. (Od čísla $f(n)$ sa líši prínajmenšom na n -tom mieste zápisu, možno aj na nejakých ďalších.)

Teda $b \neq f(n)$ pre žiadne n , čo je v spore s predpokladom, že f je bijekcia.

Cvičenia

Úloha 3.5.1. Ukážte, že kardinalita množiny všetkých iracionálnych čísel je $\mathfrak{c}$.

Úloha 3.5.2. Aká je kardinalita množiny všetkých diferencovateľných zobrazení z $\mathbb{R}$ do $\mathbb{R}$.

Úloha 3.5.3. Aká je kardinalita množiny všetkých divergentných postupností reálnych čísel? Aká je kardinalita množiny všetkých divergentných postupností racionálnych čísel?

3.6 Aplikácie kardinálnych čísel

3.6.1 Existencia transcendentných čísel

Najprv pripomeňme definíciu algebraických a transcendentných čísel.

Definícia 3.6.1. Komplexné číslo a sa nazýva *algebraické*, ak existuje polynóm $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ s celočíselnými koeficientami taký, že $f(a) = 0$, t.j. a je koreňom tohoto polynómu. Komplexné číslo, ktoré nie je algebraické, sa nazýva *transcendentné*.

Ukážeme, že množina algebraických čísel je spočítateľná. Z toho vyplýva, že existujú aj transcendentné čísla.

Tvrdenie 3.6.2. Množina $\mathbb{A}$ všetkých algebraických čísel je spočítateľná.

Dôkaz. Využijeme fakt, že každý polynóm $f \in \mathbb{C}[x]$ stupňa n má v $\mathbb{C}$ najviac n koreňov. (Presne n , ak by sme započítali aj ich násobnosť.)

Najprv vypočítajme kardinalitu množiny $\mathbb{Z}[x]$ všetkých polynómov s celočíselnými koeficientami. Každý polynóm stupňa n je jednoznačne určený postupnosťou koeficientov $a_n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$, $a_{n-1}, \dots, a_0 \in \mathbb{Z}$. Kardinalita množiny P_n všetkých polynómov stupňa n s celočíselnými koeficientami je teda $\aleph_0^n = \aleph_0$.

Množinu $\mathbb{Z}[x]$ môžeme vyjadriť ako $\mathbb{Z}[x] = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} P_n$, čiže ide o spočítateľné zjednotenie spočítateľných množín. Teda dostávame $|\mathbb{Z}[x]| = \aleph_0$.

Každé algebraické číslo je koreňom nejakého polynómu zo $\mathbb{Z}[x]$. Takýto polynóm má najviac n koreňov. Dostávame teda

$$|\mathbb{A}| \leq |\mathbb{Z}[x]| \cdot \aleph_0 = \aleph_0.$$

Súčasne platí $|\mathbb{A}| \geq \aleph_0$, keďže každé celé číslo je algebraické. □

Z predchádzajúceho tvrdenia už dostaneme existenciu transcendentných čísel (pozri úlohu 3.6.2).

Dôsledok 3.6.3. Kardinalita množiny $\mathbb{C} \setminus \mathbb{A}$ je $\mathfrak{c}$. Z toho dostávame, že existuje aspoň jedno transcendentné číslo.

Podobne $\mathbb{R} \setminus \mathbb{A}$ má kardinalitu $\mathfrak{c}$, teda existuje aspoň jedno reálne transcendentné číslo.

3.6.2 Vypočítateľné funkcie

V tejto časti si povieme – aspoň veľmi zjednodušene a neformálne – niečo o vypočítateľných funkciách.

Zjednodušene by sme mohli zaviesť pojem vypočítateľnej funkcie takto:

Definícia 3.6.4. Funkcia $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ sa nazýva *vypočítateľná*, ak existuje *algoritmus* ktorý pre vstup n vráti $f(n)$.

Otázka je, ako by sme mohli spresniť definíciu pojmu *algoritmus*, ktorý sa vyskytuje v predchádzajúcej definícii. Existuje viacero teoretických modelov algoritmu, snáď najrozšírenejší je Turingov stroj. Pre jednoduchosť si však môžete na tomto mieste predstaviť pod pojmom algoritmus program (procedúru) vo vašom obľúbenom programovacom jazyku.

Program nie je vlastne nič iné, než konečný reťazec znakov, ktorý navyše musí spĺňať určité pravidlá. Keďže používame iba konečne veľa znakov, všetkých možných programov je najviac toľko ako konečných postupností prvkov z danej konečnej množiny, čo je $\aleph_0$.

Súčasne vieme, že všetkých zobrazení z $\mathbb{N}$ do $\mathbb{N}$ je $\aleph_0^{\aleph_0} = \mathfrak{c} > \aleph_0$. Z toho vidíme, že existujú funkcie, ktoré nie sú vypočítateľné (nedajú sa naprogramovať). Zaujímavé je snáď aj to, že sa nám ich existenciu podarilo dokázať bez toho, aby sme nejakú konkrétnu nevypočítateľnú funkciu zostrojili.

Cvičenia

Úloha 3.6.1. Nech c je celé číslo. Ukážte, že komplexné číslo x je algebraické práve vtedy, keď $x + c$ je algebraické, t.j. platí ekvivalencia

$$x \in \mathbb{A} \Leftrightarrow x + c \in \mathbb{A}.$$

Platí to aj pre transcendentné čísla? Platí podobné tvrdenie s racionálnymi číslami namiesto celých?

Úloha 3.6.2. Ukážte, že množina všetkých transcendentných čísel má kardinalitu $\mathfrak{c}$.

Úloha 3.6.3. Funkcia $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sa nazýva funkciou *prvej Bairovej triedy*, ak existuje postupnosť spojitých funkcií $(f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R})_{n \in \mathbb{N}}$, ktorá k nej bodovo konverguje (t.j. pre každé $x \in \mathbb{R}$ číselná postupnosť $f_n(x)$ konverguje k $f(x)$). Aká je kardinalita množiny všetkých funkcií prvej Bairovej triedy? Viete na základe kardinality ukázať, že existuje funkcia, ktorá nie je prvej Bairovej triedy?

Úloha 3.6.4. Z daných bodov v rovine vieme vytvárať nové body pomocou pravítka a kružidla takto: Môžeme spojiť dva body priamkou. Môžeme zostrojiť kružnicu takú, že stred bude v niektorom zo zadaných bodov a polomer je vzdialenosť niektorých dvoch zadaných bodov. Dostaneme takto nové body na priesečníkoch takýchto priamok a kružníc.

Nazvime *skonštruovateľnými bodmi* v rovine body $(0, 0)$ a $(0, 1)$ a ďalej všetky body, ktoré vieme z týchto bodov dostať uvedeným spôsobom pomocou konečne veľa krokov.

Aká je kardinalita množiny všetkých skonštruovateľných bodov? Viete na základe toho zdôvodniť, že existujú body v rovine, ktoré z jednotkovej úsečky nie je možné zostrojiť pomocou pravítka a kružidla?³

³O tom, že nie všetky konštrukcie sa dajú urobiť pravítkom a kružidlom by ste už mohli vedieť z algebry; dokonca by ste mohli poznať niektoré konkrétne dĺžky, pre ktoré sa nedajú zostrojiť takto dlhé úsečky, ako napríklad $\sqrt[3]{2}$ alebo $\cos \frac{\pi}{9}$. (Tieto hodnoty súvisia s geometrickými problémami známymi už od antických čias – zdvojenie kocky, trisekcia uhla.) Pozri napríklad [KGGS, Podkapitola 4.1 a 8.2], [DF, Section 13.3], [JMP], [S, Chapter 7], [S11].

Tu sme podali alternatívny dôkaz. Má nevýhodu, že nie je konštruktívny. Na druhej strane, princíp dôkazu sa ľahko aplikuje na podobné konštrukcie, kde robíme konečne veľa krokov a pri jednom kroku vieme vytvoriť len konečne veľa bodov. (V našom prípade: Priečník dvoch priamok, priamky a kružnice resp. dvoch kružníc nám pridá najviac dva body.)

Kapitola 4

Axiomatický prístup k teórii množín

TODO

Kapitola 5

Axióma výberu

TODO

Kapitola 6

Ešte raz Cantor-Bernsteinova veta

Cieľom tejto kapitoly je hlavne ukázať ešte jeden dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety. Bude síce zdĺhavejší ako ten, ktorý sme už videli – na druhej strane azda bude do istej miery prirodzenejší.

Okrem toho si ešte povieme niečo o pevných bodoch zobrazení, čo do istej miery súvisí s niektorými vecami z matematickej analýzy, ale v istom všeobecnejšom kontexte sa dá na dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety, ktorý sme uviedli v kapitole 3 pozeráť aj ako na nájdenie vhodného pevného bodu.

6.1 Iný dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety

Už sme videli dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety (veta 3.1.6). Vlastne spomedzi vecí, ktoré sme si dokazovali to bol jediný výsledok týkajúci sa iba nerovnosti medzi kardinálnymi číslami (t.j. nie ďalších operácií s kardinálmi), pre ktorý dôkaz nebol úplne jednoduchý.¹

Táto veta hovorí, že pre kardinality množín platí:

$$|X| \leq |Y| \wedge |Y| \leq |X| \quad \Rightarrow \quad |X| = |Y|.$$

Ak to preložíme späť do jazyka zobrazení, tak vlastne tvrdíme že, ak existuje injekcia $f: X \rightarrow Y$ a existuje injekcia $g: Y \rightarrow X$, tak existuje aj bijekcia $h: X \rightarrow Y$.

Pokúsime sa ukázať si iný dôkaz tejto vety a skúsime ho uviesť takým spôsobom, aby bolo vidno ako sa naň dá prísť. (Ak sa pozrieť na predošlý dôkaz, tak zdôvodnenie jednotlivých krokov nebolo príliš zložitá. V dôkaze sa však vyskytla voľba množiny C , ktorá bola taká, že rozhodne nebolo na prvý pohľad jasné, prečo sme ju vybrali práve takto.)

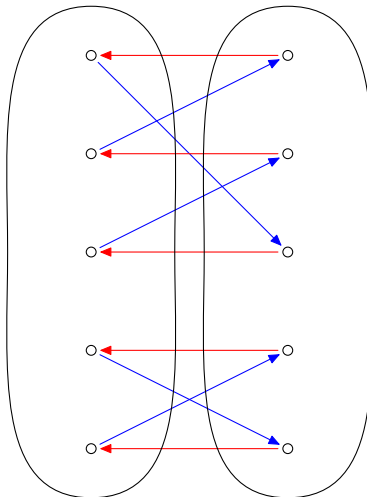
Preto teda dosť dlhý čas teraz strávime tým, že sa budeme pozeráť na nejaké konkrétne príklady zobrazení a budeme rozoberať to, ako by sa z dvoch injekcií mohla dať poskladať bijekcia, ktorú hľadáme. (A až neskôr, keď prejdeme dosť veľa príkladov a uvedomíme si pri nich niektoré veci, tak sa pokúsime napísať všeobecný dôkaz.)

¹Ďalšia netriviálna vlastnosť nerovnosti je fakt, že ľubovoľné dve kardinality sú porovnateľné (poznámka 3.1.9), t.j. pre ľubovoľné dve množiny platí

$$|A| \leq |B| \quad \vee \quad |B| \leq |A|.$$

Dôkaz tohoto tvrdenia nie je jednoduchý, resp. ak by sme ho chceli robiť, vyžiadal by si pomerne dlhú prípravu. Treba v ňom použiť axiómu výberu. Z týchto dôvodov sme toto tvrdenie síce spomenuli, ale nedokazovali.

6.1.1 Zopár príkladov ako môžeme dostať hľadanú bijekciu



Obr. 6.1: Oboma smermi máme injekciu

Sme teda v situácii ako na obrázku 6.1 – máme injekciu jedným smerom (zľava doprava, modré šípky) a opačným smerom (sprava doľava, červené šípky). Z nich by sme nejako chceli nakombinovať bijekciu. To znamená, že chceme vybrať niektoré modré a niektoré červené šípky, a to takým spôsobom, že po tomto výbere nám tieto šípky popárujú prvky jednej množiny s prvkami druhej množiny.

Ako si môžeme všimnúť, v tomto konkrétnom prípade máme viacero možností ako to urobiť (obrázok 6.2). (Tie šípky, ktoré sme vybrali, sú vyznačené hrubšie.)

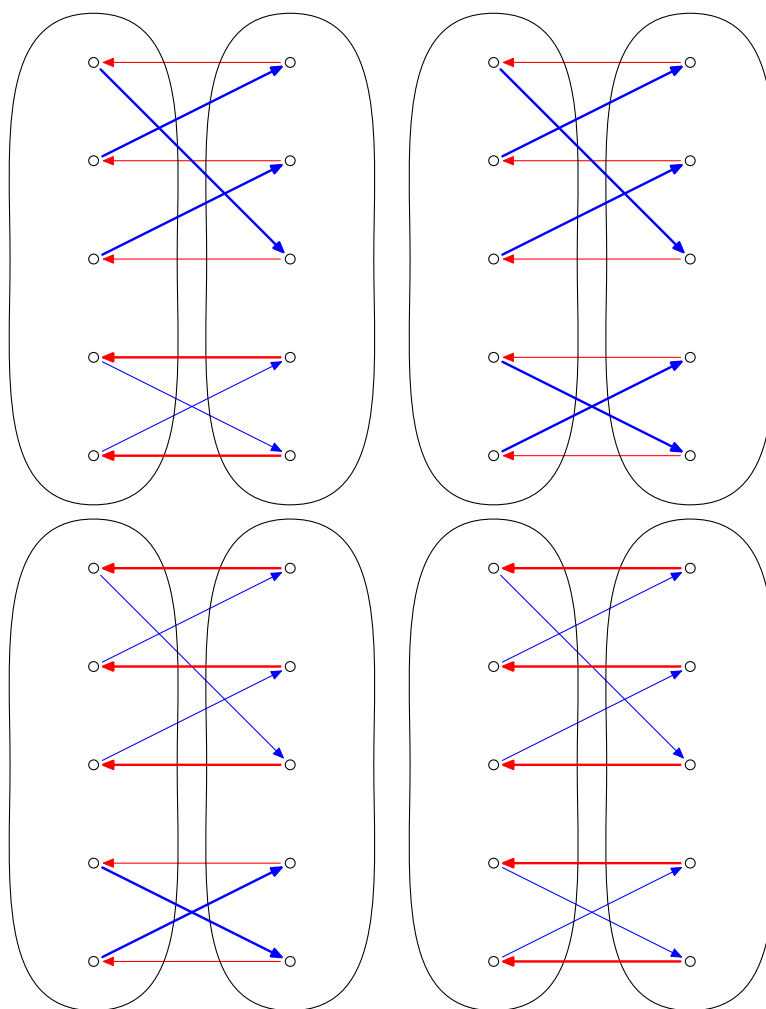
Konečné príklady nám asi príliš nepomôžu získať intuíciu na to, ako dokázať niečo podobné vo všeobecnosti – aj pre nekonečné množiny. Ak totiž máme pre konečné množiny injekciu $f: X \rightarrow Y$ a tieto dve množiny majú rovnaký počet prvkov, tak zobrazenie f je automaticky aj bijekcia (úloha 2.4.10).

Čiže v prípade konečných množín sme mohli vlastne vybrať iba červené šípky alebo iba modré šípky. (A skutočne, dve z uvedených štyroch možností boli takéto. Zodpovedá to tomu, že sme zvolili $h = f$ alebo $h = g^{-1}$.) Vo všeobecnosti (ak robíme s nekonečnými množinami), to už tak nemusí byť. Pre nekonečné množiny už vieme nájsť príklady injektívnych zobrazení, ktoré nie sú bijektívne.

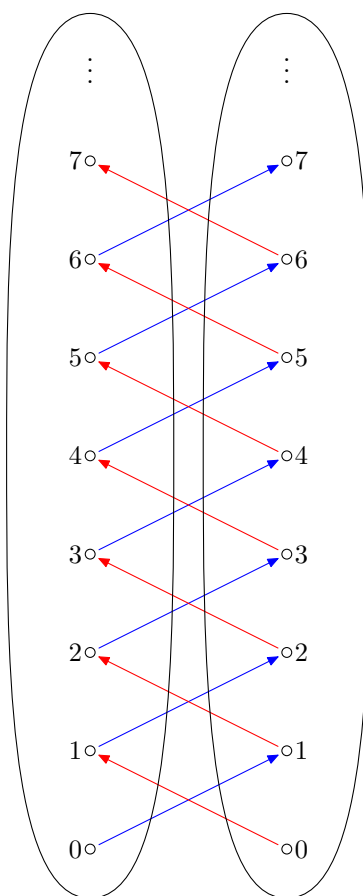
Skúsme sa pozrieť na nejaké jednoduché príklady injekcií medzi nekonečnými množinami, aby sme si uvedomili čo sa môže stať v takomto prípade.

Poznámka 6.1.1. Ešte raz pre istotu zdôrazníme jednu vec. Všetky uvedené príklady sú také, že sa môžete oprávnenne spýtať: „Načo to takto komplikujeme? Všetky tam bijekciu vidno na prvý pohľad.“ Dokonca je to tak, že v týchto príkladoch by sme mohli zobrať priamo identitu.

Dôvod prečo robíme tieto príklady, je že chceme prísť na niečo čo by nám potom mohlo pomôcť pri sformulovaní dôkazu, ktorý bude fungovať pre ľubovoľné množiny a ľubovoľnú dvojicu injekcií medzi nimi. A ak sa budeme snažiť nájsť všeobecný argument, tak veci ktoré vieme používať sú práve zobrazenia f a g . Teda bijekciu by sme nejako chceli skombinovať pomocou modrých a červených šípok.



Obr. 6.2: Štyri možnosti na výber bijekcie

Obr. 6.3: Injekcie $f(x) = g(x) = x + 1$ pre $X = Y = \mathbb{N}$

Hoci sa snažíme vymyslieť niečo, čo bude fungovať všeobecne, tak v príkladoch si radšej zoberieme nejaké jednoduché množiny, ktoré si celkom dobre vieme predstaviť a pracovať s nimi. To je dôvod, prečo sme si vybrali nejaké spočítateľné množiny a veľmi jednoduché funkcie. V príkladoch, ktoré sme si vybrali, si vieme rozmyslieť dokonca aj to, ako vyzerajú všetky bijekcie „poskladané“ len z modrých a červených šípok.

Čiže odpoveď na túto námietku je taká, že síce identita je skutočne bijekcia medzi X a Y v nasledujúcich dvoch príkladoch. Ale nie je to bijekcia takého typu, ako chceme nájsť. (Tvárime sa, že máme povolené používať len šípky ktoré už sú na obrázku nakreslené.)

Začneme s veľmi jednoduchým príkladom. Na obrázku 6.3 sme si zobrali $X = Y = \mathbb{N}$ a $f(x) = g(x) = x + 1$.

Skúsme sa pozrieť na to, ktoré z červených resp. modrých šípok môžeme vybrať. Chceme to urobiť tak, že v každom bode budeme mať iba jednu šípku. Čiže ak sa pozeráme na niektoré body v množine X , ak do nich vchádza červená šípka a vychádza modrá šípka, tak práve jednu z nich budeme musieť vybrať. Ale sú aj body, v ktorých nemáme na výber.

Ak sa napríklad pozrieme na (ľavú) nulu, tak do nej žiadna červená šípka nevchádza. Tu musíme teda použiť modrú šípku. (Ako je naznačené na prvom diagrame v obrázku 6.4.)

Skúsme uvažovať, čo sa dá robiť ďalej. Pretože do pravej jednotky už vchádza modrá

šípka, nemôžeme použiť červenú šípku idúcu z 1 do $g(1) = 2$. Keď sa teda pozeráme na ľavú dvojku, tak v nej nemáme na výber inú možnosť, ako použiť modrú šípku idúcu z 2 do $f(2) = 3$.

Keď ešte viackrát zopakujeme túto istú úvahu, tak zistíme, že podobne *musíme* použiť modrú šípku $f(4) = 5$, $f(6) = 7$ a všeobecne $f(2k) = 2k + 1$. (Dospeli sme zatiaľ k tomu čo je naznačené na treťom obrázku v 6.4.)

Veľmi podobné úvahy môžeme použiť ak sa pozeráme na prvky z množiny Y . Pre nulu máme na výber jedinú možnosť $g(0) = 1$. Potom pridáme na to, že sa už nedá použiť modrá šípka predstavujúca $f(1) = 2$ a musíme použiť červenú šípku $g(2) = 3$. Takto pridáme ďalšie červené šípky $g(2k) = 2k + 1$.

Na poslednom obrázku v 6.4 už máme naznačenú bijekciu „poskladanú“ z modrých a červených šípok. Je to konkrétne zobrazenie

$$h(x) = \begin{cases} x + 1 & \text{ak } x = 2k, \\ x - 1 & \text{ak } x = 2k - 1. \end{cases}$$

Teda pre párne čísla sme zvolili $h(x) = f(x)$. Pre nepárne čísla je $h(x)$ presne vzor pre x v zobrazení g .

Môžeme si všimnúť, že sme začali s jedným bodom (nulou), kde sme museli vybrať modrú šípku. A potom si to vynútilo výber modrej šípky aj v ďalších bodoch, do ktorých sme sa vedeli z neho dostať striedavo postupujúc po modrých a červených šípkach.

V tomto prípade sa stalo, že sme mali iba jedinú možnosť ako vyrobiť bijekciu h . (Ak sme ju chceli vyrobiť tak, že sme využívali iba modré a červené šípky, ktoré sme mali k dispozícii zo zadaných zobrazení f a g .) Vo všeobecnosti to nemusí byť tak, že bude iba jediná možnosť. To sme už videli na predošlom príklade, kde sme robili s konečnými množinami. V tom prípade sa nejednoznačnosť súvisela s tým, že šípky vytvorili cyklus. A v rámci cyklu sme si mohli vybrať či použijeme modré alebo červené šípky. Takéto cykly môžu vzniknúť samozrejme aj v prípade nekonečných množín. Ale tu môže nejednoznačnosť vzniknúť aj iným spôsobom a nasledujúci príklad by nám mal ukázať ako.

Skúsme si zobrať opäť zobrazenia zadané predpismi $f(x) = g(x) = x + 1$, ale medzi množinami $X = Y = \mathbb{Z}$.

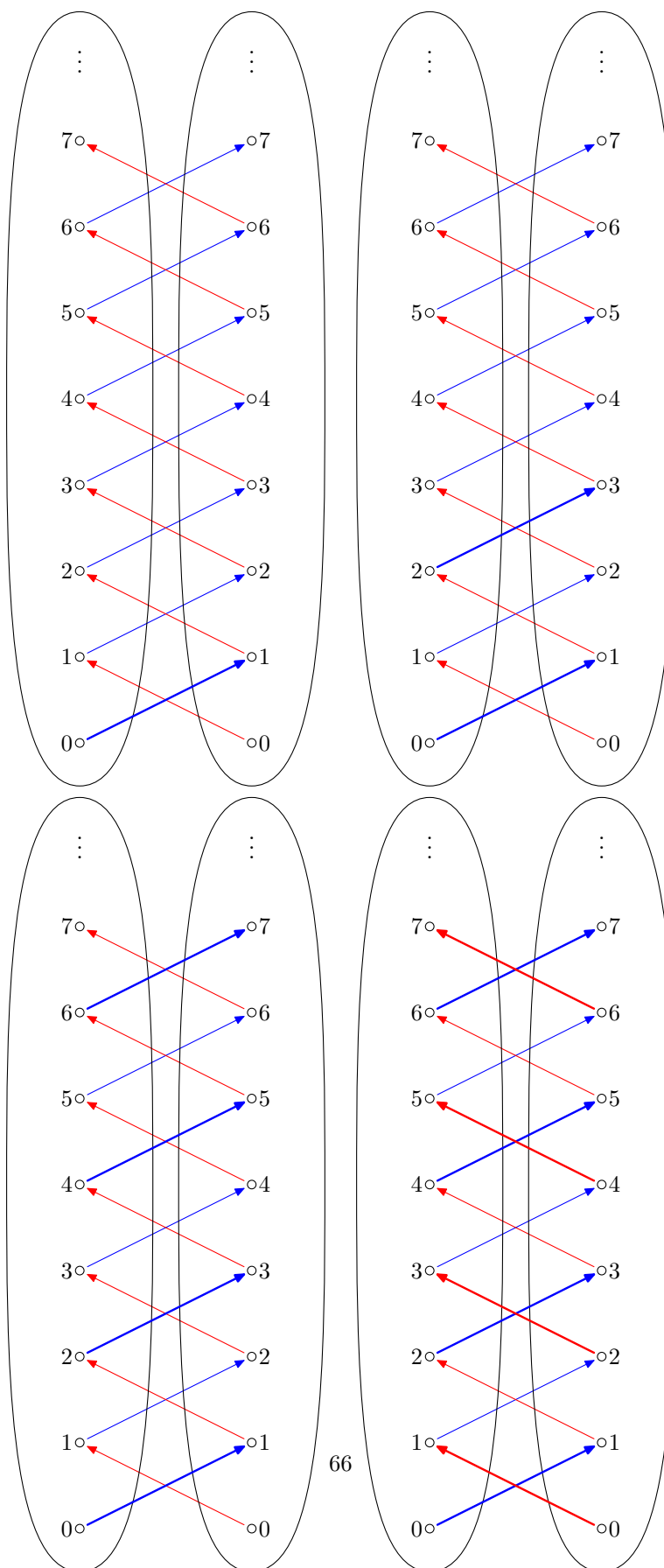
Tento príklad je v skutočnosti veľmi jednoduchý – priamo už zobrazenia f aj g sú bijekcie, takže si môžeme priamo vybrať niektoré z nich. (Obrázok 6.6)

Sú to jediné dve možnosti, či sa dajú nájsť ešte nejaké ďalšie? Pozrime sa napríklad čo sa stane, ak sme sa rozhodli, že použijeme modrú šípku zodpovedajúcu $f(0) = 1$. (Toto je možnosť na obrázku 6.7 vpravo.) Pomerne ľahko pridáme na to, že potom už máme veľa ďalších prvkov, kde je náš výber jednoznačne určený, môžeme používať veľmi podobné úvahy ako v predošlom prípade.

Konkrétne postupne pridáme na to, že do 2-ky nemôže vchádzať červená šípka, musíme teda vybrať modrú šípku $f(2) = 3$. A podobne postupnými úvahami pridáme na to, že v párnych číslach musíme použiť modré šípky $f(2k) = 2k + 1$. Stále máme na výber, čo s nepárnymi číslami. Ale akonáhle si zvolíme jednu modrú šípku, aj ostatné šípky v nepárnych číslach už musia byť modré. Ak si zvolíme jednu červenú šípku, aj ostatné šípky v nepárnych číslach musia byť červené.

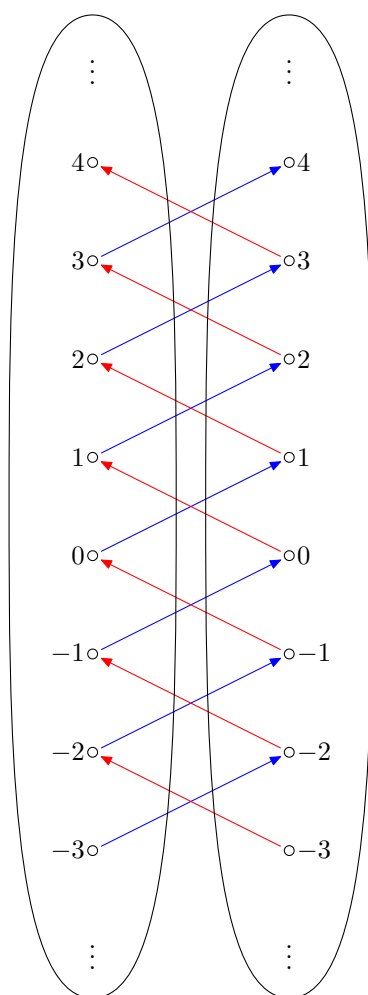
Podobne, ak by sme začali s tým, že by sme si nevybrali modrú šípku vychádzajúcu z nuly ale červenú vchádzajúcu do nuly, tak aj do ostatných párnych čísel musia vchádzať červené šípky. A podobne ako v predošlom prípade, zostanú nám dve možnosti na výber, čo urobiť s nepárnymi číslami.

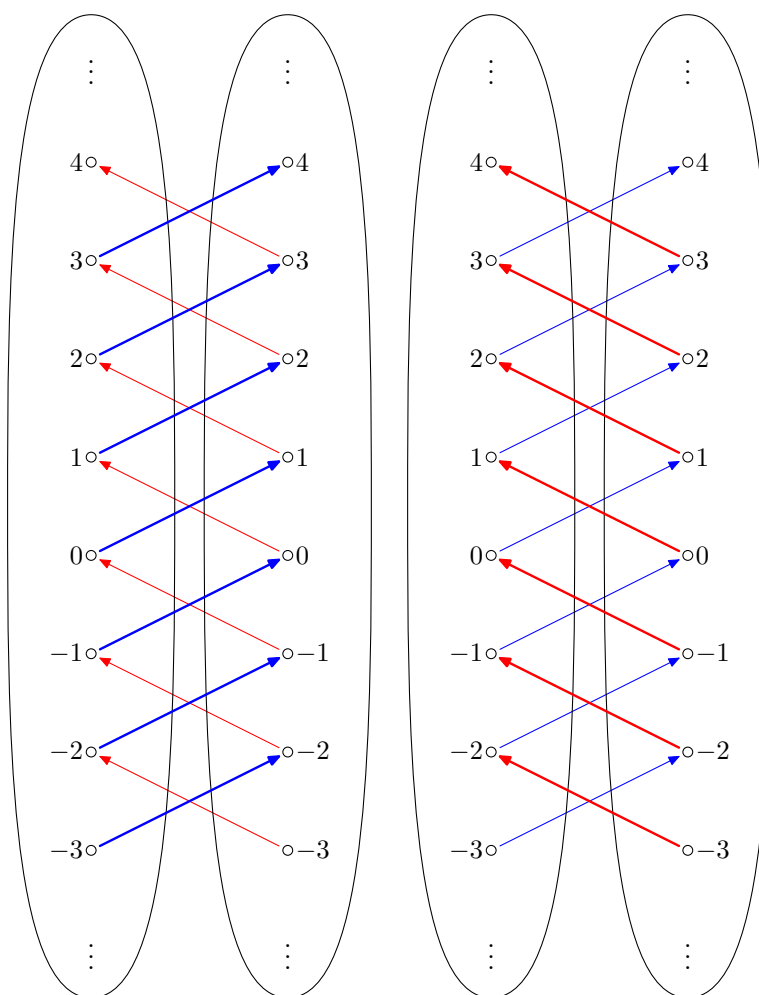
Spolu sme teda dostali všetky štyri možnosti znázornené na obrázkoch 6.6 a 6.7.



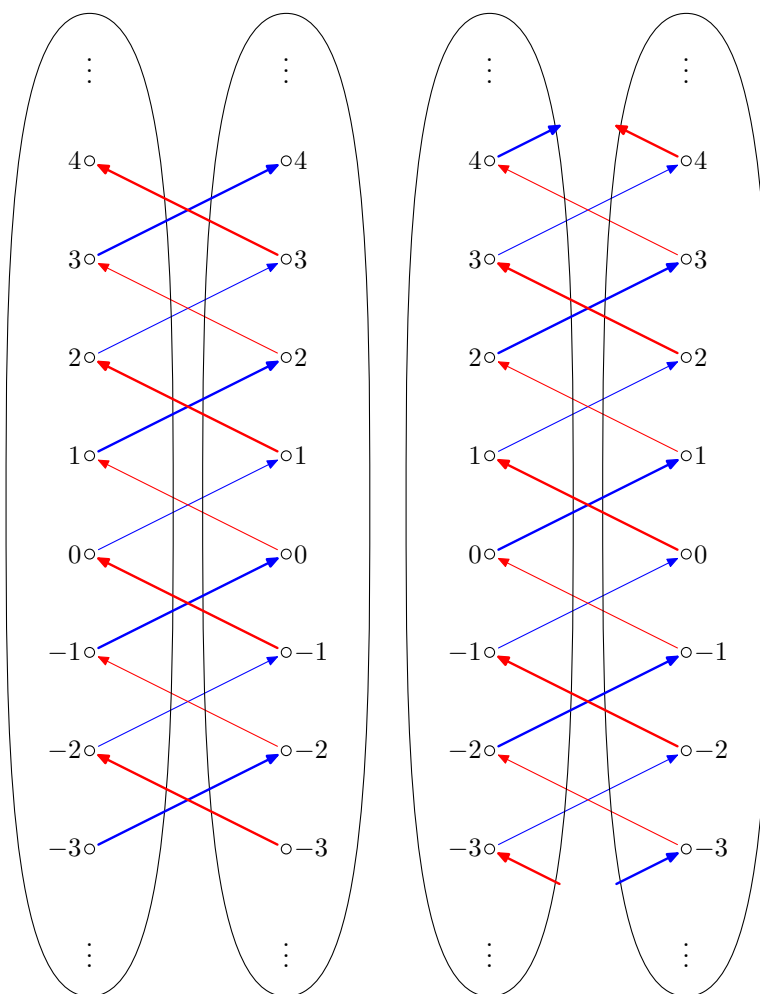
66

Obr. 6.4: Teraz máme iba jediná možnosť ako dostať bijekciu

Obr. 6.5: Injekcie $f(x) = g(x) = x + 1$ pre $X = \mathbb{Z}$



Obr. 6.6: Ako bijekcie by sme mohli zobrať priamo $h = f$ alebo $h = g^{-1}$



Obr. 6.7: Tu sú ďalšie dve možnosti ako dostať bijekciu

Zhrnutie. Čo sme vlastne vypozerovali na doterajších príkladoch? (Podobné veci môžete vidieť na ďalších podobných príkladoch, ak si ešte nejaké vyskúšate.)

Vlastne jediný problematický prípad sme videli v príklade na obrázku 6.3. Tam sme mali prvok, kde sme *museli* vybrať modrú šípku. (V tomto prípade to bola konkrétne nula, ale to isté sa stane vo všeobecnosti pre prvky, do ktorých sa nič nezobrazí zobrazením g .) To si však vynútilo aj voľbu šípok pre niektoré ďalšie prvky. Konkrétne pre všetky prvky, z ktorých sa dalo dostať do nuly tak, že sme sa „vracali“ striedavo po modrých a červených šípkach, sme tiež museli vybrať modrú farbu.

Pre ostatné prvky sa dala vybrať červená farba. (Dokonca v príklade z obrázku 6.3 to bola jediná možnosť čo urobiť pre ostatné prvky.)

6.1.2 Dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety

Teraz sa azda už môžeme pokúsiť nejakú všeobecne zapísať to, čo sme si ukázali na doterajších príkladoch.

Dôkaz. Pre ľubovoľné $x \in X$ definujeme jeho *reťazec predchodcov* takým spôsobom, že sa „budeme vracat“ po šípkach.

- Konkrétne si zoberme nejaké $x_0 \in X$ a poďme zdefinovať jeho reťazec predchodcov.
- Ak existuje y také, že $g(y) = x$, tak položíme $y_0 = y$. Ak také y neexistuje tak skončíme. (Pritom vieme z injektívnosti zobrazenia g , že takéto y existuje najviac jedno, t.j. ak sme nejaké vybrali, tak je jednoznačne určené.)
- Ak existuje $x \in X$ také, že $f(x) = y_0$, tak položíme $x_1 = x$. (Opäť platí, že x_1 je jednoznačne určené, tentokrát to zaručí injektívnosť f .) Ak také x neexistuje, tak skončíme. Vlastne to, čo sme urobili doteraz
- Indukciou postupujeme ďalej. T.j. ak existuje $y \in Y$ pre ktoré platí $g(y) = x_n$, tak položíme $y_n = y$. Podobne, ak existuje x také, že $f(x) = y_n$, tak položíme $x_{n+1} = x$.
- Ak v niektorom kroku sa také x či y nedá vybrať, tak skončíme a dostaneme iba konečnú postupnosť.

Čiže na reťazec predchodcov sa dá pozerat tak, že sme začali z nejakého prvku $x_0 \in X$ a vždy sme sa vracali po šípke, ktoré do neho vchádza – ak sme sa po nejakom konečnom počte krokov dostali do situácie, že sme v bode do ktorého nič nevchádza, tak skončíme. V opačnom prípade takto dostaneme nekonečnú postupnosť, v ktorej sa striedajú prvky z X a prvky z Y .

Môžeme si tiež všimnúť, že ak červené a modré šípky vytvoria cyklus, tak reťazec predchodcov bude nekonečná postupnosť – aj keď sa tam stále budú opakovať tie isté prvky. (Môžete sa pozrieť hneď na prvý príklad spomenutý v tejto časti – obrázok 6.1.)

Dostali sme takto pre každý prvok z X nejaký reťazec predchodcov $(x_0, y_0, x_1, \dots)$. Ten môže byť nekonečný alebo konečný. Ak je konečný, tak mohol skončiť v množine Y ; t.j. vyzeral takto: $(x_0, y_0, \dots, x_n, y_n)$, pričom na y_n sa nezobrazí zobrazením f žiadny prvok. Alebo mohol skončiť v X , čo znamená, že vyzeral takto: $(x_0, y_0, \dots, x_n)$ a z prvku x_n sa už nedá pokračovať ďalej, t.j. nemá nijaký vzor v zobrazení g . (Môže sa stať aj to, že $n = 0$. Teda že by sme mali reťazec (x_0) pozostávajúci z jediného prvku. Alebo reťazec (x_0, y_0) , ktorý by obsahoval dva prvky.)

Nazvime prvok $x \in X$ *modrý*,² ak je jeho reťazec predchodcov konečný a *končí* v X .

²Ak sa znovu vrátite k príkladom, ktoré sme si ukázali, tak by mohlo byť vidieť, že vlastne chceme hovoriť o prvkoch z X , kde *musíme* vybrať modré šípky.

Potom môžeme skúsiť urobiť niečo takéto:

$$h(x) = \begin{cases} f(x), & \text{ak } x \text{ je modré,} \\ y, & \text{také, že } g(y) = x; \text{ inak.} \end{cases} \quad (6.1)$$

Chceli by sme ukázať, že h je skutočne bijekcia medzi X a Y .

h je zobrazenie. Najprv by sme mali skontrolovať, či uvedený predpis skutočne definuje zobrazenie, t.j. či sme takto každému $x \in X$ priradili jediný prvok z Y .

Injektívnosť zobrazenia g zaručí, že pre dané x sme nemohli dostať viacero y -ov s vlastnosťou $g(y) = x$. Okrem toho si stačí uvedomiť už len to, že ak prvok nie je modrý, tak musí mať vzor v zobrazení g . (Inak by jeho reťazec predchodcov skončil hneď v x_0 .)

h je surjekcia. Chceme ukázať, že na každý prvok $y \in Y$ sa niečo zobrazí. T.j. ak sa pozrieme na konkrétne $y \in Y$, pýtame sa, či existuje $x \in X$ také, že $h(x) = y$. Zvlášť sa pozrieme na dva prípady.

Ak prvok $g(y)$ nie je modrý, tak priamo z definície zobrazenia h máme $h(g(y)) = y$, čiže v tomto prípade stačí zobrať $x = g(y)$.

Zostáva vyriešiť prípad, ak prvok $g(y)$ je modrý. Označme tento prvok x_0 a pozrime sa na to, čo vieme povedať o jeho reťazci predchodcov. Tento reťazec začína prvkami $x_0 = x$, $y_0 = y$ a navyše vieme, že je buď nekonečný alebo končí v X . Teda nemôže skončiť po týchto dvoch krokoch, je v ňom ešte aspoň jeden ďalší prvok, pre ktorý platí $f(x_1) = y$. Ešte si uvedomme, že prvok x_1 je modrý – jeho reťazec predchodcov dostaneme z reťazca pre x tak, že vynecháme prvé dva prvky. Z toho už vidíme, že $h(x_1) = y$.

h je injektia. Chceme ukázať, že ak $h(x) = h(x') = y$, tak $x = x'$. Toto očividne platí ak x aj x' sú modré, na základe injektívnosti zobrazenia f . Aj prípade, že žiaden z týchto prvkov nie je modrý sa vyrieši ľahko, vtedy máme $x = g(y) = x'$.

Zostáva teda prípad, že modrý je práve jeden z nich. Bez ujmy na všeobecnosti nech x' je modrý a x nie je. Znamená to, že $f(x') = y$ a $g(y) = x$.

Opäť sa pozrime na reťazec predchodcov pre x . Ten musí začínať takto: $x_0 = x$, $y_0 = y$, $x_1 = x'$. Ďalej bude pokračovať rovnako ako reťazec predchodcov pre x' . O ňom vieme, že končí v množine X , teda to isté platí aj pre reťazec predchodcov prvku x a dostali sme spor s predpokladom, že x nie je modrý. $\square$

V predošlom dôkaze sme skutočne urobili to, čo sme si predtým ukázali na príkladoch. Pre tie prvky, kde sme *museli* vybrať modrú šípku sme ju skutočne použili. Pre všetky ostatné sme použili červené šípky.

Poznámka 6.1.2. Azda sa oplatí uvedomiť si, že tento dôkaz sa do značnej miery podobá na predošlý dôkaz, ktorý sme videli v kapitole 3. Obrázok, 3.1 by vám mohol pripomenúť, že tam sme našli nejakú množinu C , na nej sme použili zobrazenie f a na zvyšku zobrazenie g . V terminológii z dôkazu v tejto časti, na množine C sme použili modré šípky a mimo tejto množiny červené šípky.

Aj ak sa pozriete na predpis zobrazenia f uvedený v (6.1) a v (3.2), tak vyzerajú takmer rovnako.

Podstatný rozdiel medzi týmito dvoma dôkazmi je v spôsobe, akým sme našli množinu C .

Poznámka 6.1.3. Možno sa vám dôkaz uvedený v tejto kapitole bude zdať o čosi jednoduchší a prirodzenejší. (Aj keď to do značnej miery je vec názoru a uhla pohľadu.) Takže by ste sa mohli pýtať prečo sme vybrali iný dôkaz, ktorý obsahoval jeden pomerne umelý krok.

Dôvody sú dva. Jeden z nich bol že takto sme dôkaz mohli sformulovať takým spôsobom, že sme tam využívali niektoré fakty o vzore a obraze množiny. Tieto pojmy a ich vlastnosti sme využívali inde a je užitočné niečo o nich vedieť.

Druhý dôvod je ten, že sme dostali dôkaz ktorý sa dá odprezentovať stručnejšie. V prípade, že človek má iba obmedzený čas za ktorý potrebuje prebrať nejakú predpísanú látku, je určite aj toto faktorom. (Aj v prípade, že sa vám tento dôkaz zdal jednoduchší, možno to bolo do značnej miery tým, že sme najprv prešli viacero konkrétnych príkladov. Takže je celkom dosť dobre možné, že aj ak by sme robili tento dôkaz ale snažili sa ho urobiť tak aby sme neminuli priveľa času, tak by sa vám zdal v konečnom dôsledku zložitejší.)

6.2 Cantor-Bernsteinova veta a pevné body

Dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety v kapitole 3 bol urobený tak, že sme pre istú funkciu $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ potrebovali nájsť množinu C takú, že

$$F(C) = C.$$

Definícia 6.2.1. Nech $f: X \rightarrow X$ je zobrazenie. Prvok $c \in X$ sa nazýva *pevný bod* funkcie f , ak platí

$$f(c) = c.$$

Názov *pevný bod* je asi celkom výstižný – je to bod, ktorý sa nemení zobrazením f . V našom dôkaze Cantor-Bernsteinovej vety sme potrebovali nájsť pevný bod funkcie F .

Veci súvisiace s pevnými bodmi funkcií sa študujú v rôznych oblastiach matematiky a mnohé výsledky o nich sú veľmi užitočné. My spomeňme aspoň to, že existencia pevného bodu pre našu funkciu F by sa dala dostať z niektorých výsledkov o zväzoch. Konkrétne z Knaster-Tarskiho vety o pevnom bode alebo tiež z Kleeneho vety o pevnom bode. Napriek tomu, že zväzmi sa zaoberať nebudeme, uveďme aspoň formuláciu týchto výsledkov.

Veta 6.2.2 (Knaster-Tarski). *Nech L je úplný zväz a $f: L \rightarrow L$ je monotónne zobrazenie t.j. platí*

$$(\forall x, y \in L) f(x) \leq f(y).$$

Potom existuje $c \in L$ také, že platí

$$f(c) = c$$

t.j. existuje pevný bod zobrazenia f .

Veta 6.2.3 (Kleene). *Nech L je úplný zväz, jeho najmenší prvok označme 0 . Nech $f: L \rightarrow L$ je monotónne zobrazenie, ktoré navyše zachováva supréma, t.j. pre ľubovoľné $\{x_i; i \in I\} \subseteq L$ platí*

$$f\left(\sup_{i \in I} x_i\right) = \sup_{i \in I} f(x_i).$$

Nech $c = \sup_{n \in \mathbb{N}} x_n$, kde postupnosť (x_n) je určená indukčne ako $x_0 = 0$ a

$$f(x_{n+1}) = x_n.$$

Potom platí

$$c = f(c),$$

t.j. c je pevný bod zobrazenia f .

Navyše, toto je najmenší pevný bod zobrazenia f . T.j. ak c' je tiež pevný bod, tak platí $c \leq c'$.

Uvedené vety nebudeme dokazovať. Na to by sme museli nejaký čas stráviť úvodom do teórie zväzov. Ale azda sa dá možno pozrieť na špeciálne prípady, ktoré by mohli dať približnú predstavu jednak o týchto všeobecnejších výsledkoch ale najmä o tom, že dôkaz Cantor-Bernsteinovej vety má nejaký prirodzený analóg pre funkcie definované na intervale.

Bez toho, že by sme vôbec definovali čo je úplný zväz, si povieme že $\mathcal{P}(X)$ tvorí úplný zväz, ak použijeme ako usporiadanie inklúziu. Takisto jednotkový interval $I = \langle 0, 1 \rangle$ tvorí úplný zväz ak zoberieme obvyklé usporiadanie.

Budeme sa chcieť teda pozrieť na to, čo tieto vety hovoria pre úplné zväzy $(\mathcal{P}(X), \subseteq)$ a $(I, \leq)$.

V súvislosti s Cantor-Bernsteinovou vetou nás zaujíma nájdenie pevného bodu pre funkciu $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ zadanú ako

$$F(A) = X \setminus g[Y \setminus f[A]].$$

Čo sa týka hľadania pevných bodov pre interval, takéto niečo sa dá využiť na riešenie niektorých rovníc – ako uvidíme v nasledujúcej časti.

Všimnime si, že požiadavka monotónnosti je v jednom prípade vlastne

$$A \subseteq B \quad \Rightarrow \quad F(A) \subseteq F(B).$$

Že zobrazenie F má túto vlastnosť sme už ukázali už skôr, pozri rovnosť (3.2).

Ak pracujeme s funkciou na intervale, tak predpoklad o monotónnosti funkcie $f: I \rightarrow I$ je presne to, čo obvykle rozumieme pod neklesajúcou funkciou:

$$x \leq y \quad \Rightarrow \quad f(x) \leq f(y).$$

Dôkaz Knaster-Tarskiho vety vo všeobecnom prípade (pre zväzy) sa do značnej miery podobá na to, čo sme robili s funkciou F v dôkaze Cantor-Bernsteinovej vety. Napriek tomu, že to bude takmer to isté ako v dôkaze ktorý sme už videli, tu uvedieme dôkaz. Čo vám zostáva iba na uverenie, že ak by ste sa chceli niekedy venovať zväzom a vidieť dôkaz tejto vety vo všeobecnej formulácii, tak tento dôkaz sa dá skutočne urobiť veľmi podobne ako to, čo napíšeme tu.

Tvrdenie 6.2.4. *Nech $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ je funkcia taká, že platí*

$$A \subseteq B \quad \Rightarrow \quad F(A) \subseteq F(B)$$

pre ľubovoľné $A, B \subseteq X$.

Potom existuje množina C taká, že

$$F(C) = C.$$

Dôkaz. Označme $\mathcal{S} = \{B \subseteq X; F(B) \subseteq B\}$ a položme

$$C = \bigcup \mathcal{S} = \bigcup \{B \subseteq X; B \subseteq F(B)\}.$$

Pre každé $B \in \mathcal{S}$ máme $B \subseteq C$, a teda aj

$$F(B) \subseteq F(C).$$

Spolu s $B \subseteq F(B)$ dostávame, že $B \subseteq F(C)$ platí pre všetky $B \in \mathcal{S}$, čo znamená, že aj

$$C = \bigcup \mathcal{S} \subseteq F(C).$$

Z monotónnosti potom dostaneme, že aj

$$F(C) \subseteq F(F(C)).$$

To ale znamená, že $F(C) \in \mathcal{S}$, a teda

$$F(C) \subseteq C = \bigcup \mathcal{S}.$$

Spolu teda dostávame, že

$$F(C) = C.$$

□

Môžeme sa presvedčiť, že takmer rovnaký dôkaz sa dá urobiť pre interval $I = \langle 0, 1 \rangle$.

Tvrdenie 6.2.5. *Nech $I = \langle 0, 1 \rangle$ a $f: I \rightarrow I$ je neklesajúca funkcia. Potom existuje bod $c \in I$ taký, že $f(c) = c$.*

Dôkaz. Označme $S = \{b \in I; b \leq f(b)\}$ a položíme

$$c = \sup S.$$

(Pretože S je ohraničená množina reálnych čísel, jej suprérum existuje a je to reálne číslo. Z uzavretosti intervalu I je zrejmé aj to, že $c \in I$.)

Pre $b \in S$ platí $b \leq c$ a teda (z neklesajúcnosti) aj

$$f(b) \leq f(c).$$

Máme nerovnosti $b \leq f(b)$ a $f(b) \leq f(c)$, teda vidíme, že pre každé $b \in S$ platí $b \leq f(c)$. To ale znamená, že

$$c = \sup S \leq f(c).$$

Ak opäť použijeme monotónnosť, tak dostaneme

$$f(c) \leq f(f(c)).$$

Tým sme vlastne ukázali, že $f(c) \in S$, z čoho vyplýva aj

$$f(c) \leq c = \sup S.$$

Ukázali sme nerovnosti $c \leq f(c)$ aj $f(c) \leq c$, čo znamená že

$$f(c) = c.$$

□

Ešte sa pozrime na dôkaz špeciálnych prípadov Kleeneho vety. V Kleeneho vete požadujeme navyše podmienku, že sa majú zachovávať supréma. Pre funkciu F sme ju v podstate dokázali v (3.1). (Aj keď len pre spočítateľné zjednotenia, to však vlastne v tomto dôkaze stačí. Navyše všeobecný dôkaz by bol veľmi podobný.)

Pre funkciu $f: I \rightarrow I$ je podmienka

$$f\left(\sup_{i \in I} x_i\right) = \sup_{i \in I} f(x_i)$$

určite splnená v prípade, že funkcia f je spojitá.

Pozrieme sa teda na dôkazy týchto dvoch tvrdení:

Tvrdenie 6.2.6. *Nech $F: \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ je funkcia taká, že platí*

$$A \subseteq B \quad \Rightarrow \quad F(A) \subseteq F(B)$$

$$F\left(\bigcup_{i \in I} A_i\right) = \bigcup_{i \in I} F(A_i)$$

Ak definujeme $A_0 = \emptyset$ a $A_{n+1} = F(A_n)$, tak pre množinu

$$C = \bigcup_{i=0}^n A_n$$

platí $F(C) = C$.

Navyše, ak $D \subseteq X$ je iná množina s vlastnosťou $F(D) = D$, tak $C \subseteq D$. (Inak povedané, C je najmenší pevný bod funkcie F .)

Dôkaz. Stačí skontrolovať, že

$$F(C) = F\left(\bigcup_{i=0}^n A_n\right) = \bigcup_{i=0}^n F(A_n) = \bigcup_{i=0}^n A_{n+1} = \bigcup_{i=1}^n A_n = C.$$

Teda C je skutočne pevný bod funkcie F .

Chceme ukázať aj to, že to je najmenší pevný bod. Predpokladajme teda, že $F(D) = D$. Matematickou indukciou môžeme dokázať, že pre každé $n \in \mathbb{N}$ platí

$$A_n \subseteq D.$$

1° Platí $A_0 = \emptyset \subseteq D$.

2° Ak $A_n \subseteq D$, tak z monotónnosti F dostaneme aj

$$A_{n+1} = F(A_n) \subseteq F(D) = D.$$

Ak už vieme, že $A_n \subseteq D$ platí pre všetky prirodzené čísla, tak dostaneme aj

$$C = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \subseteq D.$$

□

Uvedený dôkaz je skoro rovnaký ako induktívny dôkaz existencie množiny C z jedného z dôkazov Cantor-Bernsteinovej vety v kapitole 3. Vlastne sa iba líši tým, že sme zvlášť zvýraznili vlastnosti funkcie F , ktoré sú potrebné. V takejto podobe sme ho uviedli z dvoch dôvodov. Jednak sa dá povedať, že všeobecný dôkaz Kleeneho vety by bol veľmi podobný (ale museli by sme pracovať s ľubovoľným zväzom). Ale hlavný dôvod je ten, že takto azda trochu vidno podobnosť s iteračnou metódou hľadania pevných bodov, o ktorej hovorí nasledujúce tvrdenie a na ktorú sa trochu detailnejšie pozrieme v nasledujúcej kapitole.

Opäť, podobne ako v predošlom prípade, sa dá dôkaz takmer bez zmeny zopakovať pre uzavretý interval.

Tvrdenie 6.2.7. *Nech $I = \langle 0, 1 \rangle$ $f: I \rightarrow I$ je zobrazenie ktoré je neklesajúce a spojité. Definujme postupnosť a_n rekurentne ako $a_0 = 0$ a*

$$a_{n+1} = f(a_n).$$

Potom pre $c = \sup_{n \in \mathbb{N}} a_n$ platí

$$f(c) = c.$$

Navyše, c je najmenší pevný bod funkcie f . T.j. ak pre nejaké $d \in I$ platí $f(d) = d$, tak $c \leq d$.

Všimnime si, že už vo formulácii tvrdenia využívame tiež uzavretosť a ohraničenosť intervalu I . (Vďaka tomu máme zaručené, že číslo c skutočne existuje a tiež že patrí do I .)

Dôkaz. Indukciou vieme dokázať, že pre každé n platí $a_n \leq a_{n+1}$. Pre $a_0 = 0$ je táto nerovnosť jasná z toho, že pracujeme na intervale $I = \langle 0, 1 \rangle$. Indukčný krok: Ak platí $a_n \leq a_{n+1}$, tak aj $a_{n+1} = f(a_n) \leq f(a_{n+1}) = a_{n+2}$.

Teda postupnosť (a_n) je neklesajúca. Pretože f je neklesajúca, tak aj postupnosť $f(a_n)$ je neklesajúca.

Z toho vidíme, že

$$\begin{aligned} \sup_{n \in \mathbb{N}} a_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} a_n, \\ \sup_{n \in \mathbb{N}} f(a_n) &= \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n). \end{aligned}$$

Pretože funkcia f je spojitá, máme teda³

$$f\left(\sup_{n \in \mathbb{N}} a_n\right) = f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} a_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = \sup_{n \in \mathbb{N}} f(a_n).$$

Z toho dostaneme, že

$$f(c) = f\left(\sup_{n \in \mathbb{N}} a_n\right) = \sup_{n \in \mathbb{N}} f(a_n) = \sup_{n \in \mathbb{N}} a_{n+1} = c.$$

Ukázali sme teda, že c je pevný bod zobrazenia f . Ak $d \in I$ je iný pevný bod zobrazenia f , tak najprv indukciou ukážeme, že

$$a_n \leq d$$

pre ľubovoľné $n \in \mathbb{N}$.

1° Platí $a_0 = 0 \leq d$.

2° Ak $a_n \leq d$, tak aj

$$a_{n+1} = f(a_n) \leq f(d) = d.$$

Teraz už ľahko vidíme aj to, že

$$c = \sup_{n \in \mathbb{N}} a_n \leq d.$$

□

Predchádzajúci dôkaz sme uviedli najmä preto, aby sme ukázali, že takmer totožne sa dá viesť dôkaz v prípade potenčnej množiny a aj pre jednotkový interval. Pre spojitú funkciu však existencia pevného bodu dá dostať priamo z vety o strednej hodnote.

³V predošlom dôkaze sme mali podmienku, že f zachováva supréma, uvedenú priamo v predpokladoch. Tu sme ukázali, že vyplýva z neklesajúcnosti a spojitosti. (V princípe by sme mohli toto tvrdenie dokázať rovnakým spôsobom v trochu všeobecnejšej podobe – ale aj tak by sme získali menej všeobecné tvrdenie než sme dokázali vyššie, čiže sa to asi neoplatí robiť za cenu toho, že formulácia tvrdenia bude menej jasná.)

Tvrdenie 6.2.8. *Nech $I = \langle 0, 1 \rangle$ a $f: I \rightarrow I$ je spojité zobrazenie. Potom existuje bod $c \in I$ taký, že*

$$f(c) = c.$$

Dôkaz. Nech $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ je zobrazenie definované ako

$$g(x) = f(x) - x.$$

Toto zobrazenie je spojité a platí $g(0) \geq 0$, $g(1) = f(1) - 1 \leq 0$.

Podľa vety o strednej hodnote potom existuje bod $c \in I$ taký, že

$$g(c) = f(c) - c = 0,$$

čiže $f(c) = c$. □

Pretože o spojitých funkciách máme lepšiu predstavu, tak tu možno aj lepšie vidno prečo v Kleeneho vete dostaneme najmenší pevný bod resp. aj to prečo sme pevný bod v Knaster-Tarskiho vete hľadali naozaj uvedeným spôsobom. Vlastne začneme niekde nad osou $y = x$, ale graf funkcie sa časom dostane pod ňu. „Najlavejší“ bod, kde graf funkcie prvýkrát prekročí hranicu rozdeľujúcu tieto dve časti bude pevným bodom našej funkcie. Pre spojitú funkciu to vcelku vidno z obrázku. My sme to zdôvodnili aj ak predpoklad o spojitosti nahradíme predpokladom, že funkcie je monotónna.

6.3 Hľadanie pevných bodov

V tejto časti sa chceme zamerať na to, ako sa dajú riešiť rovnice tvaru

$$f(x) = x$$

kde f je funkcia $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ resp. niekedy pre zobrazenia funkcie $f: A \rightarrow \mathbb{R}$, kde $A \subseteq \mathbb{R}$.

Ukážeme si, že aspoň pre nejaké dosť pekné funkcie máme metódu na nájdenie riešení tejto rovnice, ktorá funguje pomerne dobre.

Veci, ktoré spomenieme tu, by skôr patrili do matematickej analýzy (a prípadne aj do numerickej analýzy). Aj z tohoto dôvodu si v niektorých častiach upustím od toho aby som sa snažil sformulovať presné tvrdenia a robiť dôkazy. Skôr sa budem snažiť ukázať na nejakých príkladoch, že takéto niečo naozaj funguje aspoň pre funkcie spĺňajúce nejaké podmienky. (A takisto si ukážeme aj príklady, keď takáto metóda nepovedie k cieľu.)

Dôvod, prečo som sem takéto niečo zaradil, je že by mohlo byť vidieť ako sa táto metóda (ktorá je pre reálne funkcie vcelku prirodzená) podobá na jeden z dôkazov, ktorý sme uviedli pre Cantor-Bernsteinovu vetu. A azda ak bude jasná táto analógia, tak uvedený dôkaz už bude menej záhadný – dá sa naň pozeráť tak, že hľadáme pevný bod nejakej funkcie a chceme vyskúšať, či nám náhodou nepomôžu podobné úvahy ako fungujú pri reálnych funkciách.

6.3.1 Ako sa dostať iteráciami k pevnému bodu

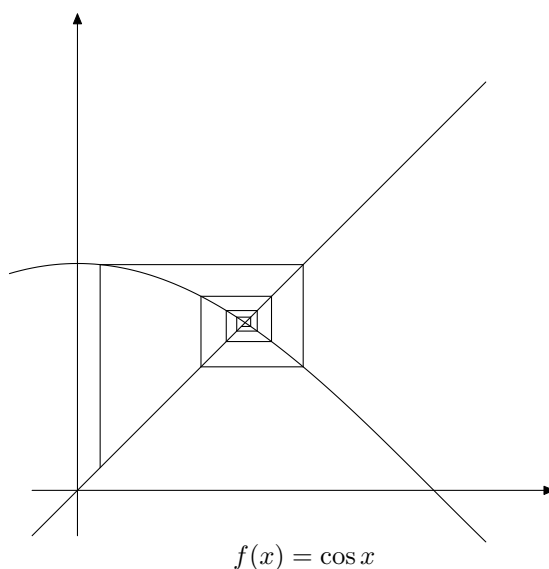
Možno sa vám už niekedy stalo, že ste (či už z nudy alebo z frustrácie ak vám niečo nevychádzalo) začali na kalkulačke opakovane stláčať tlačítko pre tú istú funkciu. A s prekvapením ste zistili, že po istom čase sa dostanete k tomu istému číslu, ktoré sa už nemení. Skúsme sa pozrieť na to, prečo takéto niečo funguje pre *niektoré* funkcie. Napríklad sa pozrime na to, čo by sa stalo ak by ste opakovane používali funkciu kosínus (a kalkulačku mali prepnutú na radiány).

Teda vlastne ste postupne počítali hodnoty $\cos x, \cos(\cos x), \cos(\cos(\cos x)), \cos(\cos(\cos(\cos x))), \dots$. Trochu prehľadnejšie to môžeme zapísať tak, že ste začali s nejakým bodom x_0 a postupne ste počítali

$$\begin{aligned}x_1 &= \cos x_0 \\x_2 &= \cos x_1 \\x_{n+1} &= \cos x_n\end{aligned}$$

A teraz teda môžeme sformulovať otázku tak, že či takáto postupnosť bude k niečomu konvergovať. A ak áno, čo vieme o limite tejto postupnosti povedať.

Obrázok 6.8 by vám mal dať celkom dobrú predstavu o tom, čo sa tu deje. Všimnite si, že na tomto obrázku sú skutočne nakreslené hodnoty, ktoré dostaneme takýmito iteráciami. (Začali sme s nejakou hodnotou x_0 . Pozreli sme sa na graf funkcie, z neho vieme vyčítať $f(x_0)$. Ak nájdeme bod na priamke $y = x$ na tej istej úrovni, získali sme x_1 , atď.)⁴



Obr. 6.8: Iterácie funkcie $f(x) = \cos x$

Aj ak by sme začali z nejakého iného bodu, tak vcelku ľahko vidno, že pomerne rýchlo sa dostaneme do intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a ďalej sa už budú správať iterácie tejto funkcie podobne ako na našom obrázku. Z obrázku tiež vidno, že tieto iterácie postupne konvergujú k riešeniu rovnice

$$x = \cos x.$$

Skúsme sa pozrieť na to, že niečo podobné by mohlo mať šancu zmysluplne fungovať pre spojité reálne funkcie.

Ešte raz pripomeňme definíciu pevného bodu, teraz už len v tom kontexte, ktorému sa chceme venovať v tejto časti.

⁴Takémuto spôsobu kreslenia hodnôt iterácií funkcie sa zvykne hovoriť aj cobweb plot: https://en.wikipedia.org/wiki/Cobweb_plot.

Definícia 6.3.1. Nech $A \subseteq \mathbb{R}$ a nech $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ je ľubovoľné zobrazenie. Potom bod $x \in A$ sa nazýva *pevný bod zobrazenia* f , ak platí

$$f(x) = x.$$

Predpokladajme na začiatok pre jednoduchosť, že $A = \mathbb{R}$. Potom pre ľubovoľné $x \in \mathbb{R}$ môžeme presne rovnako definovať postupnosť, ktorú dostaneme iteráciami tejto funkcie:

$$\begin{aligned} x_0 &= x \\ x_{n+1} &= f(x_n) \end{aligned}$$

Ak je funkcia f spojitá a postupnosť (x_n) *konverguje*, tak sa dá ľahko prísť na to, že limita bude pevný bod funkcie f .

Pre $c = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ dostávame

$$f(c) = f\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = c.$$

Takže takýmto spôsobom môžeme nájsť pevný bod funkcie f . (Alebo aspoň niektorý z pevných bodov, ak ich má naša funkcia viac.)

Pre niektoré funkcie sa však môže stať, že uvedená postupnosť nebude konvergovať – ľahko sa o tom môžeme presvedčiť na konkrétnych príkladoch. Na obrázku 6.9 je príklad funkcie, ktorá má jediný pevný bod. Ale bez ohľadu na to, kde začneme, tak postupnosť iterácií bude divergovať. (Jedinou výnimkou je, ak by sme za x_0 zvolili priamo tento pevný bod.)

Môže sa stať aj to, že v závislosti od voľby x_0 táto postupnosť niekedy dokonverguje k x_0 a niekedy nie. Takýto príklad je na obrázku 6.10 pre funkciu $f(x) = x^2$ resp. $f(x) = \sqrt{x}$. Na tom istom príklade si môžeme všimnúť, že hoci niektoré voľby x_0 postupnosť konverguje k pevnému bodu $x = 1$, ale k pevnému bodu $x = 0$ sa takto nevieme dostať – iba ak by sme hneď na začiatku trafili priamo do tohoto bodu, teda pre voľbu $x_0 = 0$.

Detailnejšie skúmanie toho, za akých predpokladov na funkciu f vieme ukázať existenciu pevného bodu resp. to či k nemu konverguje postupnosť iterácií, nechajme na predmety z matematickej analýzy. Azda sa ale oplatí spomenúť prinajmenšom nasledujúcu vetu, s ktorou ste sa možno už mohli stretnúť:

Veta 6.3.2 (Banachova veta o pevnom bode). *Nech $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ je funkcia a existuje konštanta $\alpha < 1$ taká, že pre ľubovoľné $x, y \in \mathbb{R}$ platí*

$$|f(x) - f(y)| \leq \alpha |x - y|.$$

Potom funkcia f má práve jeden pevný bod c .

Postupnosť iterácií

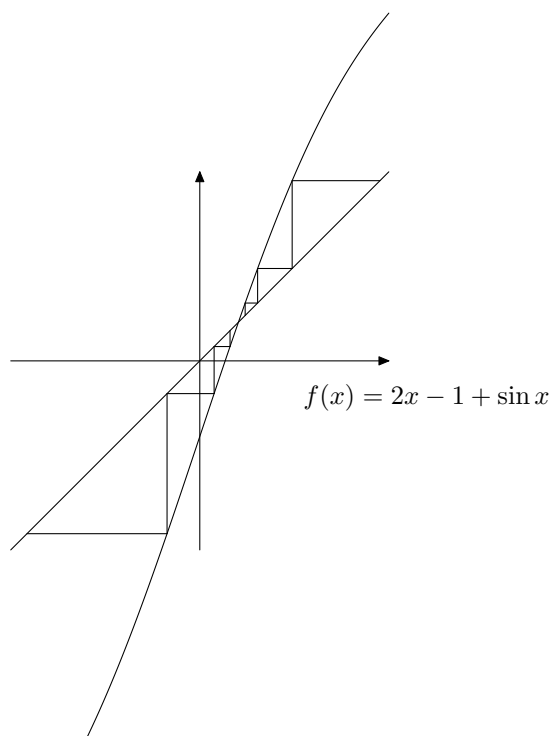
$$x_{n+1} = f(x_n)$$

konverguje k tomuto bodu c pre ľubovoľnú voľbu x_0 .

Ak ste sa na niektorom predmete stretli s touto vetou, tak bola pravdepodobne sformulovaná o čosi všeobecnejšie (napríklad pre metrické priestory alebo aspoň pre lineárne normované priestory).

Môžeme si všimnúť, že z podmienky uvedenej v tejto vete automaticky vyplýva spojitosť. Funkcie, ktoré spĺňajú túto podmienku pre nejaké α , sa volajú *lipschitzovské*.

Pomocou tejto vety by sme napríklad vedeli ukázať, že ak je naša funkcia spojitá diferenciovateľná a pre jej pevný bod platí $|f'(c)| < 1$, tak pri voľbe x_0 dostatočne blízko bodu c dostaneme konvergenciu.

Obr. 6.9: Iterácie funkcie $f(x) = 2x - 1 + \sin x$

6.3.2 Babylonská metóda hľadania odmocniny

Pozrieme sa na jednu pomerne známu (a azda aj trochu zaujímavú) aplikáciu tejto metódy. Konkrétne využijeme funkciu

$$f(x) = \frac{x + \frac{a}{x}}{2}$$

a presvedčíme sa, že ju vieme použiť na výpočet odmocniny $\sqrt{a}$.

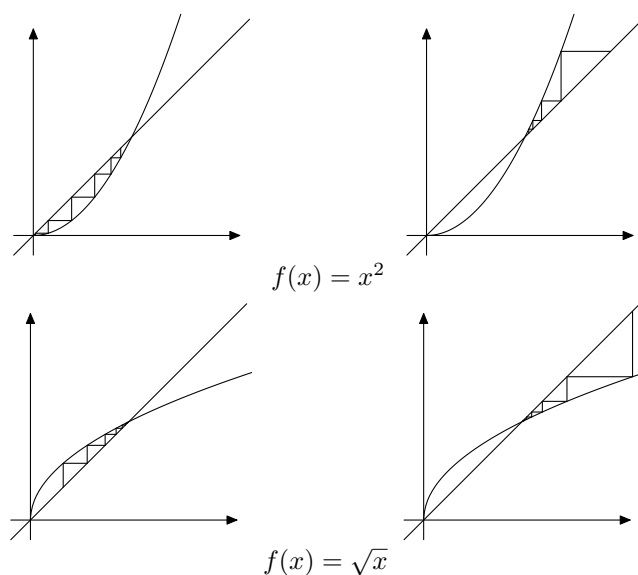
Asi je dosť ľahké presvedčiť sa, že ak $x > 0$ je pevný bod tejto funkcie, čiže vyhovuje rovnici

$$x = \frac{x + \frac{a}{x}}{2},$$

tak skutočne musí platiť $x = \sqrt{a}$. Otázka je, či by sme nejako vedeli zdôvodniť, že ak začneme s ľubovoľným $x_0 > 0$, tak iterácie tejto funkcie skutočne budú konvergovať.

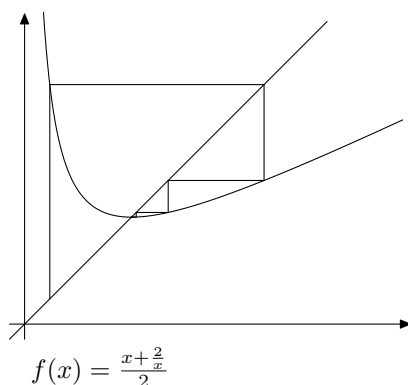
Vyskúšaním prvých pár hodnôt pre $a = 2$ sa môžeme presvedčiť, že táto metóda pomerne rýchlo konverguje k hodnote $\sqrt{2}$, ktorá je približne 1.4142.

x	$y = (x + \frac{2}{x})/2$		y^2
1	$\frac{3}{2}$	1.5	$\frac{9}{4} = 2 + \frac{1}{4}$
$\frac{3}{2}$	$\frac{17}{12}$	1.4167	$\frac{289}{144} = 2 + \frac{1}{144}$
$\frac{17}{12}$	$\frac{577}{408}$	1.4142	$\frac{332929}{166464} = 2 + \frac{1}{166464}$

Obr. 6.10: Iterácie funkcie $f(x) = x^2$ resp. $f(x) = \sqrt{x}$

Už po troch krokoch (ktoré sú ešte asi zrátať ručne), sme dostali pomerne malú chybu a vypočítali sme odmocninu z dvoch na viacero správnych desatinných miest. (Konkrétne $\sqrt{2} = 1.414\,213\,562\dots$ a $577/408 = 1.414\,215\,686$.)

Táto metóda by sa teda dala použiť aj ak by sme chceli vypočítať približnú hodnotu $\sqrt{a}$ ručne. (A aj ak chceme naprogramovať algoritmus, ktorý ráta približné hodnoty odmocnín, tak táto metóda bude vcelku efektívna.)

Obr. 6.11: Pre funkciu $f(x) = \frac{x + \frac{2}{x}}{2}$ iterácie konvergujú k $\sqrt{2}$

Jedna pomerne prirodzená interpretácia toho, čo tu robíme, je takýto pohľad na vec: Ak $x = \sqrt{a}$, tak platí $x = \frac{a}{x}$. Ak sme sa netrafili, tak z čísel x a $\frac{a}{x}$ bude jedno menšie ako $\sqrt{a}$ a druhé väčšie ako $\sqrt{a}$. (Za predpokladu, že sme zvolili kladné x .) Teda zobrať aritmetický priemer týchto dvoch čísel ako lepšiu aproximáciu odmocniny vyzerá byť vcelku zmysluplný nápad.

Tvrdenie 6.3.3. *Nech $a > 0$ a*

$$f(x) = \frac{x + \frac{a}{x}}{2}.$$

Potom postupnosť určená rekurzívnym predpisom

$$x_{n+1} = f(x_n) = \frac{x_n + \frac{a}{x_n}}{2}$$

konverguje k $\sqrt{a}$ pre ľubovoľnú voľbu $x_0 > 0$.

Dôkaz. Skúsme sa pozrieť na to, čo sa stane pri jednej iterácii.

$$\frac{x + \frac{a}{x}}{2} - \sqrt{a} = \frac{x^2 - 2\sqrt{a}x + a}{2x} \quad (6.2)$$

$$= \frac{(x - \sqrt{a})^2}{2x} \quad (6.3)$$

Z toho vidíme, že pre $n \geq 1$ máme $x_n \geq \sqrt{a}$. (Výraz $f(x) - \sqrt{a}$ je vždy nezáporný.)

Pre vzdialenosť $f(x)$ od $\sqrt{a}$ dostaneme z (6.2)

$$\left| \frac{x + \frac{a}{x}}{2} - \sqrt{a} \right| = \frac{1}{2} \left| 1 - \frac{\sqrt{a}}{x} \right| \cdot |x - \sqrt{a}| < \frac{1}{2} |x - \sqrt{a}| \quad (6.4)$$

To znamená, že vzdialenosť $x_n - \sqrt{a}$ sa v každom kroku zmenší prinajmenšom na polovicu. Dostaneme tak (pre $n \geq 1$)

$$|x_n - \sqrt{a}| = x_n - \sqrt{a} \leq \frac{1}{2^n} |x_1 - \sqrt{a}|,$$

z čoho už je jasné že postupnosť x_n konverguje k $\sqrt{a}$. □

Na obrázku 6.11 si tiež môžeme všimnúť, že pevný bod $x = \sqrt{a}$ je súčasne bod, v ktorom funkcia $f(x) = \frac{1}{2} \left(x + \frac{a}{x} \right)$ nadobúda minimum. Nie je to náhoda – platí to pre ľubovoľné a , nie iba pre $a = 2$. Stačí si uvedomiť, že

$$\frac{x + \frac{a}{x}}{2} \geq \sqrt{x \cdot \frac{a}{x}} = \sqrt{a}$$

vyplýva napríklad zo známej nerovnosti medzi aritmetickým a geometrickým priemerom.⁵

⁵AM-GM nerovnosť vo všeobecnosti hovorí, že

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \geq \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n}$$

platí pre ľubovoľné nezáporné reálne čísla $x_1, \dots, x_n$; pričom rovnosť nastane iba v prípade $x_1 = x_2 = \dots = x_n$.

Literatúra

- [B1] Lev Bukovský. Úvod do matematickej logiky. http://ics.upjs.sk/~novotnyr/home/skola/logika_a_teorie_mnoziny/ltm.pdf.
- [B2] Lev Bukovský. *Množiny a všetičo okolo nich*. Alfa, Bratislava, 1985.
- [BŠ] Bohuslav Balcar and Petr Štěpánek. *Teorie množin*. Academia, Praha, 2001.
- [Č] Juraj Činčura. Elementárna teória čísel. Poznámky k prednáške, <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/sleziak/cvicenia/tc/>.
- [D] Keith Devlin. *The Joy of Sets*. Springer-Verlag, New York, 1993. Undergraduate Texts in Mathematics.
- [DF] David S. Dummit and Richard M. Foote. *Abstract Algebra*. John Wiley and Sons, 3rd edition, 2004.
- [E] Herbert B. Enderton. *A Mathematical Introduction to Logic*. Harcourt/Academic Press, San Diego, 2001.
- [F] Thomas Forster. *Logic, Induction and Sets*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003. LMS Student Texts 56.
- [GG] Ivor Grattan-Guinness. *The Search for Mathematical Roots 1870–1940*. Princeton University Press, Princeton, 2000.
- [HMu] John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, and Jeffrey D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Massachusetts, 2nd edition, 2001.
- [JMP] Arthur Jones, Sidney A. Morris, and Kenneth R. Pearson. *Abstract Algebra and Famous Impossibilities*. Springer-Verlag, New York, 1991. Universitext.
- [KGGS] Tibor Katriňák, Martin Gavalec, Eva Gedeonová, and Jaroslav Smítal. *Algebra a teoretická aritmetika 1*. UK, Bratislava, 2002.
- [KLŠZ] M. Kolibiar, A. Legén, T. Šalát, and Š. Znam. *Algebra a príbuzné disciplíny*. Alfa, Bratislava, 1992.
- [L] Seymour Lipschutz. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Set Theory and Related Topics*. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [RF] Branislav Rován and Michal Forišek. Formálne jazyky a automaty. Poznámky k prednáške, <http://foja.dcs.fmph.uniba.sk/materialy.php>.

- [Sl1] Martin Sleziak. 1-MAT-260 Algebra 2. Poznámky k prednáške, <http://msleziak.com/vyuka/2011/alg2m/>.
- [Sl2] Martin Sleziak. Teória množín. Poznámky k prednáške, <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/sleziak/vyuka/>.
- [So] Antonín Sochor. *Klasická matematická logika*. Karolinum, Praha, 2001.
- [Š] Petr Štěpánek. Predikátová logika. http://kti.ms.mff.cuni.cz/teaching/files/materials/StepanekPetr_PredikatovaLogika.pdf.
- [S] Ian Stewart. *Galois theory*. CRC, Boca Raton, 3rd edition, 2004.
- [ŠHHK] T. Šalát, A. Haviar, T. Hecht, and T. Katriňák. *Algebra a teoretická aritmetika 2*. Alfa, Bratislava, 1986.
- [ŠS] Tibor Šalát and Jaroslav Smítal. *Teória množín*. UK, Bratislava, 1995.
- [VN] J. Vencko and T. Neubrunn. *Matematická analýza*. MFF UK, Bratislava, 1992.
- [WIK] Wikipedia. <http://en.wikipedia.org>.
- [Z] Pavol Zlatoš. *Ani matematika si nemôže byť istá sama sebou*. IRIS, Bratislava, 1995. <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/zlatos/animat/animat.pdf>.

Register

číslo

- algebraické, 57
- kardinálne
 - konečné, 34
 - nekonečné, 34
- transcendentné, 57

bijekcia, 24

de Morganove pravidlá, 8

diagonálna metóda, 47

diagram

Vennov, 19

disjunkcia, 8

dvojica

usporiadaná, 22

ekvivalencia, 8

funkcia, 23

lipschitzovská, 79

implikácia, 8

obmena, 9

injekcia, 24

inklúzia, 14

kardinalita, 28

kardinalita kontinua, 34

konjunkcia, 8

kvantifikátor, 9

existenčný, 9

všoebecný, 9

množina

nespočítateľná, 48

spočítateľná, 48

mohutnosť, 28

naivná teória množín, 5

negácia, 8

obor

definičný, 23

hodnôt, 23

obraz množiny, 25

paradox

Russellov, 5

pevný bod, 72, 79

podmnožina, 14

vlastná, 14

potenčná množina, 14

prienik, 15

projekcia, 43

rovnosť množín, 14

rozdiel množín, 18

súčet kardinálnych čísel, 32

súčin

karteziánsky, 22

funkcií, 26

súčin kardinálnych čísel, 32

surjekcia, 24

symetrická diferencia množín, 18

veta

Cantor-Bernsteinova, 29

Cantorova, 47

o pevnom bode

Banachova, 79

Kleeneho, 72

Knaster-Tarskiho, 72

vzor množiny, 25

zákony

de Morganove, 19

zúženie zobrazenia, 24

zjednotenie

dvojice množín, 15

zobrazenie, 23

bijektívne, 24

identické, 24
injektívne, 24
inverzné, 24
na, 24
prosté, 24
surjektívne, 24

Zoznam symbolov

$\neg$	8
$\wedge$	8
$\vee$	8
$\Rightarrow$	8
$\Leftrightarrow$	8
$\forall$	9
$\exists$	9
$\subseteq$	14
$\mathcal{P}(A)$	14
$\subsetneq$	14
$A \cup B$	15
$A \cap B$	15
$\bigcup \mathcal{S}$	16
$\bigcap \mathcal{S}$	16
$\bigcap_{A \in \mathcal{S}} A$	16
$\bigcap_{i \in I} A_i$	16
$A \setminus B$	18
$A \triangle B$	18
(a, b)	22
$\times$	22
$f: A \rightarrow B$	23
$f: a \mapsto b$	24
$f _C$	24
f^{-1}	24
$f[A]$	25
$f^{-1}[B]$	25
$f^{-1}(b)$	25
$f \times g$	26
$ X = Y $	28
$ X \leq Y $	29
$ X < Y $	29
$\aleph_0$	34
$\mathfrak{c}$	34
p_A	43
p_B	43