

# 1-INF-115 Algebra 1

Martin Sleziak

11. septembra 2023

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>4</b>
1.1 Sylaby a literatúra . . . . .	4
1.2 Základné označenia . . . . .	4
<b>2 Množiny a zobrazenia</b>	<b>6</b>
2.1 Dôkazy . . . . .	7
2.1.1 Základné typy dôkazov . . . . .	7
2.1.2 Matematická indukcia . . . . .	8
2.1.3 Drobné rady ako dokazovať . . . . .	9
2.1.4 Výroky, logické spojky, tautológie . . . . .	10
2.1.5 Negácia výrokov s kvantifikátormi . . . . .	11
2.2 Množiny a zobrazenia . . . . .	12
2.2.1 Množiny . . . . .	12
2.2.2 Zobrazenia . . . . .	14
2.2.3 Vzor a obraz množiny* . . . . .	20
2.3 Permutácie . . . . .	21
<b>3 Grupy a polia</b>	<b>24</b>
3.1 Binárne operácie . . . . .	24
3.1.1 Zovšeobecnený asociatívny zákon* . . . . .	29
3.2 Grupy . . . . .	32
3.3 Polia . . . . .	37
<b>4 Vektorové priestory</b>	<b>47</b>
4.1 Vektorový priestor . . . . .	47
4.2 Podpriestory . . . . .	52
4.3 Lineárna kombinácia, lineárna nezávislosť . . . . .	55
4.3.1 Lineárna kombinácia a lineárny obal . . . . .	55
4.3.2 Lineárna nezávislosť . . . . .	58
4.4 Báza a dimenzia . . . . .	63
4.5 Lineárne a direktné súčty podpriestorov . . . . .	70
<b>5 Lineárne zobrazenia a matice</b>	<b>75</b>
5.1 Matice . . . . .	75
5.2 Riadková ekvivalencia a hodnosť matice . . . . .	77
5.3 Lineárne zobrazenia . . . . .	86
5.4 Súčin matic . . . . .	91
5.5 Inverzná matica . . . . .	96

5.6	Elementárne riadkové operácie a súčin matíc . . . . .	101
5.7	Sústavy lineárnych rovníc . . . . .	104
5.7.1	Homogénne sústavy lineárnych rovníc . . . . .	105
5.7.2	Gaussova eliminačná metóda . . . . .	108
5.7.3	Frobeniova veta . . . . .	110
5.8	Jadro a obraz lineárneho zobrazenia . . . . .	113
5.9	Hodnosť transponovanej matice . . . . .	117
5.10	Násobenie blokových matíc* . . . . .	118
<b>6</b>	<b>Determinanty</b>	<b>121</b>
6.1	Motivácia . . . . .	121
6.2	Definícia determinantu . . . . .	123
6.3	Výpočet determinantov . . . . .	126
6.3.1	Laplaceov rozvoj . . . . .	126
6.3.2	Výpočet pomocou riadkových a stĺpcových operácií . . . . .	129
6.4	Determinant súčinu matíc . . . . .	133
6.5	Využitie determinantov . . . . .	135
6.5.1	Výpočet inverznej matice . . . . .	135
6.5.2	Cramerovo pravidlo . . . . .	137
<b>A</b>	<b>Delenie so zvyškom</b>	<b>142</b>
<b>B</b>	<b>Komplexné čísla</b>	<b>143</b>
B.1	Definícia komplexných čísel, algebraický tvar komplexného čísla . . . . .	143
B.2	Geometrická interpretácia komplexných čísel, goniometrický tvar, Moivrova veta	146
B.3	Riešenie rovníc v komplexných číslach . . . . .	148
B.3.1	Kvadratické rovnice s reálnymi koeficientmi . . . . .	149
B.3.2	Binomické rovnice . . . . .	150
B.4	Zopár ďalších vecí súvisiacich s komplexnými číslami . . . . .	151
	<b>Register</b>	<b>156</b>
	<b>Zoznam symbolov</b>	<b>158</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Verzia: 11. septembra 2023

### 1.1 Sylaby a literatúra

**Sylaby predmetu:** Základné pojmy potrebné k abstraktnému vybudovaniu vektorových priestorov (grupy, polia, vektorové priestory). Podpriestory, lineárna závislosť a nezávislosť vektorov, Steinitzova veta, báza vektorového priestoru. Matice. Lineárne zobrazenia. Kompozícia lineárnych zobrazení, inverzné matice. Riešenia homogénnych a nehomogénnych systémov lineárnych rovníc. Determinanty, základné vlastnosti a aplikácie.

**Literatúra:** Štruktúra prednášky je v podstate totožná so spôsobom, akým je táto téma vysvetlená vo výbornej učebnici [KGGG]. Témy, ktoré budeme preberať na tejto prednáške (mnohé z nich podstatne podrobnejšie), môžete nájsť aj v knihe [K]. Pri príprave textu som použil aj knihu [A]. Niektoré cvičenia som vybral z [W].

Ďalšia literatúra dostupná v slovenčine a češtine: [BM, SGZ]. Z literatúry dostupnej na internete spomeňme [Z1, O, Slo, H].

Hviezdičkou sú označené nepovinné časti – nebudú na skúške a pravdepodobne na ne nevyšší na ne čas na prednáške; sú tu kvôli tomu, aby ste si ich mohli pozrieť, ak vás niečo z nich zaujme.

### 1.2 Základné označenia

Pre číselné obory budeme používať nasledujúce označenia:

$\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$  = množina prirodzených čísel (Teda nulu považujeme za prirodzené číslo.)

$\mathbb{Z} = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$  = množina celých čísel

$\mathbb{Z}^+ = \mathbb{N} \setminus \{0\}$  = množina kladných celých čísel

$\mathbb{Q}$ =racionálne čísla,  $\mathbb{R}$ =reálne čísla,  $\mathbb{C}$ =komplexné čísla

$\mathbb{R}^+ = \{x \in \mathbb{R}; x > 0\}$

$\mathbb{R}_0^+ = \{x \in \mathbb{R}; x \geq 0\}$

$\mathbb{R}^- = \{x \in \mathbb{R}; x < 0\}$

$\mathbb{R}_0^- = \{x \in \mathbb{R}; x \leq 0\}$

Na pripomenutie zo strednej školy: *racionálne čísla* sú čísla tvaru  $\frac{p}{q}$ , kde  $p, q \in \mathbb{Z}$  a  $q \neq 0$ . Inými slovami povedané, zlomky. Každé racionálne číslo sa dá upraviť do základného tvaru, teda do tvaru  $\frac{p}{q}$ , kde  $p$  a  $q$  sú nesúdeliteľné.

S komplexnými číslami ste na strednej škole pravdepodobne nie všetci stretli. Budeme používať niektoré ich základné vlastnosti (a aj v ďalšom štúdiu pre vás budú užitočné). To najzákladnejšie o nich je uvedené v dodatku B a budeme sa snažiť venovať im čas aj na cvičeniach.

## Kapitola 2

# Množiny a zobrazenia

Na vysokej škole sa stretnete s trochu iným prístupom k matematike ako doteraz. Pre modernú matematiku je typický axiomatický prístup, ktorý spočíva v tom, že vychádzame z niektorých pojmov, ktoré nedefinujeme (chápeme ich ako základné, zvyknú sa nazývať *primitívne pojmy*). Okrem nich zavedieme niekoľko axióm, ktoré hovoria o ich základných vlastnostiach. Všetky ďalšie výsledky musia byť odvodené len z týchto axióm, všetky ďalšie pojmy sú definované len pomocou primitívnych pojmov.

Prvou matematickou knihou, v ktorej sa používali axiómy, boli Euklidove Základy.<sup>1</sup> Priekopníkom používania axiomatickej metódy v modernej matematike bol David Hilbert.<sup>2</sup> V súčasnosti sa za základ matematiky, na základe ktorého sa dajú sformalizovať všetky študované disciplíny, považuje teória množín.

Jedným z cieľov snahy zachytiť matematiku ako celok pomocou axióm (tzv. Hilbertov program) bola snaha o dôkaz bezospornosti matematiky. Dnes je známe, že tento cieľ sa nedá naplniť v takom rozsahu, ako si to predstavoval Hilbert. (Viac sa o tom dá dozvedieť napríklad v knihe [Z2], ktorá však vyžaduje aspoň základné znalosti z teórie množín.) Napriek tomu mal však Hilbertov program obrovský vplyv na podobu modernej matematiky.

Axiomatický prístup má svoje výhody aj nevýhody. Formalizácia prináša výhodu v tom, že sa dôkazy dajú ľahšie skontrolovať (dokonca sa dajú, hoci pomerne pracne, prepísať do takej podoby, aby boli skontrolovateľné počítačovým programom). Takisto ak zdefinujeme nejaký pojem pomocou nejakého systému axióm a z týchto axióm dokážeme nejaké tvrdenia, vieme, že tieto tvrdenia platia pre každý matematický objekt, ktorý spĺňa tieto axiómy. Tento princíp bude v rámci tejto prednášky často používaný.

Za nevýhodu možno považovať to, že formalizáciou sa môže do istej miery stratiť intuitívne porozumenie pojmom s ktorými pracujeme. Preto je dôležité dbať na obe stránky – nielen naučiť sa pracovať s formalizmom, ktorý budeme používať, ale tvrdeniam a dôkazom aj rozumieť.

Zápis tvrdení i definícií nových pojmov bude o čosi formálnejší, než ste boli zvyknutí doteraz. Hoci matematický jazyk, ktorý sa používa v dôkazoch, môže byť pre vás nový a trochu neobvyklý, je veľmi dôležité, aby ste sa ho naučili používať, a ešte dôležitejšie aby ste tomuto jazyku a hlavne dôkazom, ktoré budeme robiť, aj porozumeli.

---

<sup>1</sup>Euklides (3.–2. stor. pr.n.l) bol grécky matematik a geometer. Jeho najvýznamnejšie dielo *Základy* sa počtom vydaní radí na druhé miesto medzi všetkými knihami v histórii, hneď po Biblii.

<sup>2</sup>David Hilbert (1862–1943) bol nemecký matematik. Je považovaný za jedného z najvýznamnejších matematikov v svojom období ale aj v celej histórii matematiky.

## 2.1 Dôkazy

Z toho, čo sme povedali o axiomatickom prístupe je zrejmé, že všetky tvrdenia, ktoré budeme používať, sa budeme snažiť aj dokázať. Preto je užitočné povedať si pár slov o dôkazoch. Veľmi dobrý úvodný text o tejto problematike je [KGGs, Kapitola 1.1]. Knihy [L] a [HS] sú venované rôznym postupom používaným pri dôkazoch matematických tvrdení, môžete tam nájsť (okrem iného) aj samostatnú kapitolu venovanú matematickej indukcii.

Ešte prv ako sa začneme venovať formálnej stránke dôkazov, mohli by sme sa zamyslieť nad tým, načo vlastne dokazujeme. Dôkaz poskytuje overenie správnosti tvrdenia – hoci sa vám niektoré tvrdenia môžu zdať intuitívne zrejme, až podrobný dôkaz nám dá istotu, že je skutočne správne. Pre človeka, ktorý sa venuje matematike, je teda prirodzená potreba vidieť aj dôkaz vysloveného tvrdenia. Považoval by som za úspech tejto prednášky, keby na konci semestra boli pre vás matematické dôkazy väčším prostriedkom na overenie, či platí matematická veta, ktorá vás zaujíma, než nutným zlom, ktoré musíte zvládnuť kvôli úspešnému absolvovaniu skúšky.

### 2.1.1 Základné typy dôkazov

Hoci spôsob, ako dokazovať matematické tvrdenia, sa najlepšie naučíte na konkrétnych príkladoch, predsa len na tomto mieste zhrnieme terminológiu a ukážeme si na veľmi jednoduchých príkladoch niektoré základné typy dôkazov.

Najjednoduchším typom dôkazu je *priamy dôkaz*. Jednoducho postupujeme z predpokladov tvrdenia, až kým sa nám nepodarí dostať dokazovaný výrok. Vyskúšajme si to na príklade nasledujúceho tvrdenia.

**Tvrdenie 2.1.1.** *Nech  $n$  je celé číslo. Potom zvyšok čísla  $n^2$  po delení 4 je 0 alebo 1. Pritom ak  $n$  je párne, tak  $n^2$  je deliteľné 4 a ak  $n$  je nepárne tak  $n^2$  má zvyšok 1.*

*Dôkaz.* Sú 2 možnosti. Buď  $n$  je párne, alebo  $n$  je nepárne.

Ak  $n$  je párne, tak  $n = 2k$  (pre nejaké celé číslo  $k$ ) a  $n^2 = 4k^2$ , čiže  $n^2$  má zvyšok 0 po delení 4.

Ak  $n$  je nepárne, tak  $n = 2k + 1$ , čiže  $n^2 = 4k^2 + 4k + 1 = 4(k^2 + k) + 1$  má zvyšok 1 po delení 4.  $\square$

Iný typ dôkazu je *dôkaz sporom*. Pri tomto type dôkazu začneme s predpokladom, že dokazované tvrdenie neplatí. Ak sa nám z tohoto tvrdenia podarí odvodiť niečo, čo určite platiť nemôže, musí byť predpoklad o neplatnosti dokazovaného tvrdenia chybný – a tým sme tvrdenie vlastne dokázali.

**Tvrdenie 2.1.2.** *Ak pre celé čísla  $a$ ,  $b$ ,  $c$  platí rovnosť  $a^2 + b^2 = c^2$ , tak aspoň jedno z čísel  $a$ ,  $b$  je párne.*

*Dôkaz.* Sporom. Predpokladajme, že by  $a$  aj  $b$  boli nepárne. Potom podľa tvrdenia 2.1.1 majú  $a^2$  aj  $b^2$  zvyšok 1 po delení 4. Ich súčet  $c^2 = a^2 + b^2$  má potom zvyšok 2. Podľa tvrdenia 2.1.1 sú však druhá mocnina môže mať ako zvyšok po delení 4 iba číslo 0 alebo 1 – dostali sme spor.  $\square$

*Nepriamy dôkaz* sa dosť podobá na dôkaz sporom. Väčšina tvrdení, ktoré dokazujeme majú tvar implikácie: snažíme sa dokázať, že ak platia predpoklady  $P$ , tak platí aj záver  $Z$ . Nepriamy dôkaz spočíva v tom, že namiesto toho dokazujeme: Ak neplatí záver  $Z$ , tak neplatí ani predpoklad  $P$ . (Skúste si rozmyslieť, prečo je to to isté ako dokazovať pôvodnú implikáciu. K implikáciám aj k princípu nepriameho dôkazu sa ešte vrátíme v časti 2.1.4 venovanej tautológiám.)

**Tvrdenie 2.1.3.** *Nech  $n$  je prirodzené číslo. Ak  $n^2$  je deliteľné štyrmi, tak  $n$  je párne.*

*Dôkaz.* Nepriamo. Nech  $n$  je nepárne, teda má tvar  $n = 2k + 1$ . Potom  $n^2 = (2k + 1)^2 = 4k^2 + 4k + 1 = 4(k^2 + k) + 1$  má zvyšok 1 po delení štyrmi, čiže nie je deliteľné štyrmi.  $\square$

Všimnite si, že v predchádzajúcom tvrdení sme namiesto výroku z tvrdenia dokazovali: Ak  $n$  nie je párne, tak  $n^2$  nie je deliteľné štyrmi.

## 2.1.2 Matematická indukcia

Často používaný, a preto aj dosť dôležitý spôsob dôkazu, je dôkaz pomocou matematickej indukcie. Povedzme si teda o ňom pár slov a ilustrujeme si ho na niekoľkých príkladoch. (S matematickou indukciou ste sa už stretli na strednej škole, táto podkapitola slúži len na pripomenutie.)

Dôkaz *matematickou indukciou* spočíva v tom, že ak chceme dokázať nejaký výrok  $V(n)$  pre všetky prirodzené čísla  $n \in \mathbb{N}$ , dokážeme ho najprv pre  $n = 0$  a ďalej dokážeme, že ak platí  $V(n)$ , tak tento výrok platí pre nasledujúce číslo, teda platí  $V(n + 1)$ . (Toto treba dokázať pre všetky prirodzené čísla  $n$ .)

Dôkaz, že z  $V(n)$  vyplýva  $V(n + 1)$  nazývame *indukčný krok* a výrok  $V(n)$  použitý v tomto kroku sa volá *indukčný predpoklad*.

Dokazovaný výrok môže obsahovať viacero premenných, preto pri dôkaze matematickou indukciou vždy treba uviesť, vzhľadom na ktorú premennú sa indukcia robí.

Niekedy sa indukčného kroku v tvare  $V(n) \Rightarrow V(n + 1)$  (z  $V(n)$  vyplýva  $V(n + 1)$ ) používa tvar  $V(n - 1) \Rightarrow V(n)$  (z  $V(n - 1)$  vyplýva  $V(n)$ ). Oba prístupy sú rovnocenné, v druhom prípade samozrejme dokazujeme indukčný krok len pre  $n \geq 1$ . (Pre  $n = 0$  by ani nedával zmysel, lebo  $V(-1)$  vôbec nemusí byť zadané.) My budeme používať prvý z týchto dvoch prístupov.

Niekedy (keď výrok dokazujeme pre všetky čísla počnúc od nejakého daného čísla  $n_0$ ) nerobíme prvý krok indukcie pre  $n = 0$  ale pre  $n = n_0$ . Aj v indukčnom kroku potom môžeme použiť predpoklad  $n \geq n_0$  namiesto  $n \geq 0$ .

**Príklad 2.1.4.** Uvažujme geometrickú postupnosť určenú predpisom  $a_0 = 1$  a  $a_{n+1} = 2a_n$ . (Teda členy tejto postupnosti sú  $a_0 = 1, a_1 = 2, a_2 = 4, \dots, a_n = 2^n, \dots$ ) Dokážeme, že pre súčet prvých  $n + 1$  členov tejto postupnosti platí

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

Budeme postupovať matematickou indukciou vzhľadom na  $n$ .

1° Pre  $n = 0$  dostaneme rovnosť  $2^0 = 2^1 - 1$ , teda tvrdenie platí.

2° Indukčný krok. Predpokladajme, že rovnosť platí pre  $n$ . Potom pre  $n + 1$  dostaneme

$$1 + 2 + \dots + 2^n + 2^{n+1} = (1 + 2 + \dots + 2^n) + 2^{n+1} \stackrel{\text{IP}}{=} 2^{n+1} - 1 + 2^{n+1} = 2 \cdot 2^{n+1} - 1 = 2^{n+2} - 1,$$

čo môžeme stručnejšie zapísať ako

$$\sum_{k=0}^{n+1} 2^k = 2^{n+1} + \sum_{k=0}^n 2^k \stackrel{\text{IP}}{=} 2^{n+1} + 2^{n+1} - 1 = 2 \cdot 2^{n+1} - 1 = 2^{n+2} - 1.$$

Indukčný predpoklad sme použili na mieste označenom IP.

Takmer rovnakým spôsobom by ste mohli odvodiť vzorec pre súčet prvých  $n + 1$  členov ľubovoľnej geometrickej postupnosti. (Teda  $a_0$  bude ľubovoľné a aj dvojkou nahradíme ľubovoľným kvocientom  $q \neq 1$ .) Vyskúšajte si to!



**Poznámka 2.1.5.** Okrem dôkazov sa matematická indukcia používa aj pri definíciách. Ak chceme zdefinovať nejaký matematický objekt pre ľubovoľné prirodzené číslo  $n$ , môžeme postupovať tak, že ho zdefinujeme pre  $n = 0$  a ďalej zavedieme  $(n + 1)$ -vý objekt pomocou  $n$ -tého. V takomto prípade hovoríme o *definícii matematickou indukciou*.

Definíciu matematickou indukciou sme už použili v predchádzajúcom príklade – postupnosť  $(a_n)$  bola určená tým, že  $a_0 = 1$  a  $a_{n+1} = 2a_n$ .

Veľmi dôležitým variantom matematickej indukcie je *úplná indukcia*. V tomto prípade v indukčnom kroku dokazujeme platnosť nového tvrdenia nie pomocou platnosti pre predchádzajúce číslo, ale v dôkaze využijeme platnosť tvrdenia pre všetky (prípadne viaceré) menšie čísla.

Zatiaľ čo indukčný krok matematickej indukcie sme mohli schematicky zapísať ako

$$V(n) \Rightarrow V(n + 1)$$

pri úplnej indukcii v indukčnom kroku dokazujeme

$$V(0), V(1), V(2), \dots, V(n) \Rightarrow V(n + 1);$$

inak povedané, treba dokázať že ak výrok  $V(k)$  platí pre všetky  $k < n$ , tak platí aj pre číslo  $n$ . (Samozrejme, aj tu by sme mohli úplne rovnocenne použiť indukčný krok kde by sme dokazovali  $V(n)$  z platnosti dokazovaného výroku pre  $k = 0, 1, \dots, n - 1$ . Niekedy budeme používať úplnú indukciu aj v takejto podobe.) Aj tu platí, že indukciu môžeme začať aj od iného prvku namiesto nuly.

**Príklad 2.1.6.** Uvažujme postupnosť určenú predpisom  $a_0 = 1$  a  $a_{n+1} = a_0 + a_1 + \dots + a_n = \sum_{k=0}^n a_k$ . (Všimnite si, že sme túto postupnosť definovali pomocou úplnej indukcie – definícia  $(n + 1)$ -vého prvku využíva všetky menšie prvky.) Dokážeme úplnou indukciou vzhľadom na  $n$ , že pre  $n \geq 1$  platí  $a_n = 2^{n-1}$ .

1° Pre  $n = 0$  máme  $a_1 = 1 = 2^{1-1}$ , teda v tomto prípade dokazovaná rovnosť platí.

2° Indukčný krok: Predpokladajme, že  $a_k = 2^k$  pre  $k = 0, 1, \dots, n$ . Potom

$$a_{n+1} = \sum_{k=0}^n a_k = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k \stackrel{\text{IP}}{=} 1 + \sum_{k=1}^n 2^{k-1} \stackrel{(1)}{=} 1 + \sum_{j=0}^{n-1} 2^j \stackrel{(2)}{=} 1 + 2^n - 1 = 2^n.$$

(V rovnosti (1) sme zaviedli novú sumačnú premennú  $j = k - 1$  a v rovnosti (2) sme využili výsledok dokázaný v príklade 2.1.4.)

**Poznámka 2.1.7.** Určite ste si všimli, že v príkladoch dôkazov matematickou indukciou sme používali zápisy typu  $\sum_{k=1}^n a_k = a_1 + \dots + a_n$ . (Pokiaľ nie ste na používanie znaku  $\sum$  zvyknutí zo strednej školy, vo vysokoškolskej matematike sa s ním budete stretávať veľmi často, takže si naň treba čím skôr zvyknúť.) Zjednodušené sa dá povedať, že ak sa pri úprave výrazov vyskytne výraz obsahujúci tri body  $(\dots)$ , v skutočnosti je za touto úpravou skrytý dôkaz matematickou indukciou. (Väčšinou natoľko jednoduchý, že dôkaz správnosti tejto úpravy samostatne nedokazujeme.)

### 2.1.3 Drobné rady ako dokazovať

Hoci nasledujúca rada na prvý pohľad znie veľmi naivne, pri hľadaní dôkazu nejakého tvrdenia je užitočné uvedomiť si, čo všetko máme zadané a čo potrebujeme dokázať. Pri jednoduchších

dôkazoch sa často stane, že keď si poriadne zapíšeme vlastnosť, ktorú chceme dokázať a takisto všetky predpoklady, takmer okamžite zbadáme, ako postupovať. Samozrejme, aj pri zložitejších dôkazoch je veľmi dobre nestrácať zo zreteľa aké predpoklady môžeme použiť a k čomu vlastne chceme dospieť.

Niekedy môže byť užitočné aj hľadanie protipríkladu, prípadne overenie tvrdenia na konkrétnych príkladoch. Môže sa stať, že si uvedomíte, prečo sa vám kontrapríklad nedarí zostrojiť alebo pri overovaní, či tvrdenie platí pre konkrétny príklad pridete na nejakú zákonitosť, ktorá vám nakoniec pomôže dané tvrdenie dokázať.

Ďalšia rada je, že občas nie je zlé uvedomiť si, či ste skutočne v dôkaze použili všetky predpoklady. Tvrdenia a úlohy v učebniciach bývajú často formulované tak, že tam nie sú uvedené žiadne zbytočné predpoklady navyše. Preto dôkaz, kde ste nepoužili všetky predpoklady, je trochu podozrivý a treba ho skontrolovať. (Aj keď sa samozrejme môže stať, že zákerý autor úlohy či skúšajúci mohol pridať nejaké predpoklady navyše.)

### 2.1.4 Výroky, logické spojky, tautológie

Toto je ďalšia téma, ktorú by ste mali ovládať už zo strednej školy – napriek tomu však pripomenieme niektoré základné fakty.

**Definícia 2.1.8.** *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.<sup>3</sup>

$P$	$\neg P$	$P$	$Q$	$P \wedge Q$	$P$	$Q$	$P \vee Q$	$P$	$Q$	$P \Rightarrow Q$	$P$	$Q$	$P \Leftrightarrow Q$
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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Tautológie môžeme overovať jednoducho metódou, ktorú poznáte zo strednej školy.

**Príklad 2.1.9.** 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 si ukážeme overenie jedného z de Morganových pravidiel.

**Príklad 2.1.10.** *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 výraze vystupuje viacero premenných, budeme potrebovať viac riadkov tabuľky na to, aby sme vyčerpali všetky možnosti.

<sup>3</sup>Na 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.

$P$	$Q$	$P \vee Q$	$\neg(P \vee Q)$	$\neg P \wedge \neg Q$	$\neg(P \vee Q) \Leftrightarrow (\neg P \wedge \neg Q)$
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.

**Príklad 2.1.11.** 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.)

V cvičení 2.1.1 nájdete viacero tautológií. Je dobré si uvedomiť ako súvisia tautológie s niektorými typmi dôkazov. Tautológia z príkladu 2.1.11 je presne princíp nepriameho dôkazu, ktorý sme už spomínali. Tautológiu z cvičenia 2.1.1b) budeme tiež často používať pri dokazovaní – namiesto výroku tvaru  $P \Leftrightarrow Q$  dokážeme zvlášť jednotlivé implikácie  $P \Rightarrow Q$  a  $Q \Rightarrow P$ .

### 2.1.5 Negácia výrokov s kvantifikátormi

Okrem logických spojok budeme na zápis tvrdení používať aj kvantifikátory. Budeme používať všeobecný (univerzálny) kvantifikátor

$$(\forall x \in A)P(x)$$

vo význame „pre každý prvok  $x$  množiny  $A$  platí  $P(x)$ “ a existenčný kvantifikátor

$$(\exists x \in A)P(x),$$

ktorý znamená „existuje prvok  $x$  množiny  $A$ , pre ktorý platí  $P(x)$ “. (Tu  $P(x)$  predstavuje *výrovkovú funkciu* – výrok, v ktorom vystupuje „premenná“  $x$ .)

Veľmi dôležité budú nasledovné pravidlá pre negáciu výrokov s kvantifikátormi.

$$\begin{aligned} \neg[(\forall x)P(x)] &\Leftrightarrow (\exists x)(\neg P(x)), \\ \neg[(\exists x)P(x)] &\Leftrightarrow (\forall x)(\neg P(x)). \end{aligned}$$

(Teda existenčný kvantifikátor sa mení na všeobecný a obrátene a výrok pod kvantifikátorom sa zneguje.)

## Cvičenia

**Úloha 2.1.1.** Dokážte, že nasledujúce výroky sú tautológie:

- a)  $(\neg P \vee Q) \Leftrightarrow (P \Rightarrow Q)$   
 b)  $(P \Leftrightarrow Q) \Leftrightarrow [(P \Rightarrow Q) \wedge (Q \Rightarrow P)]$   
 c)  $\neg(P \wedge Q) \Leftrightarrow (\neg P \vee \neg Q)$   
 d)  $((P \wedge Q) \Rightarrow R) \Leftrightarrow (P \Rightarrow (Q \Rightarrow R))$

## 2.2 Množiny a zobrazenia

### 2.2.1 Množiny

Už sme spomenuli, že základným stavebným kameňom súčasnej matematiky je teória množín. Viac sa o nej dozviete v 4. ročníku (viď. tiež [ŠS]). V tejto prednáške úplne vystačíme so základnými predstavami o množinách. (Takýto intuitívny prístup k teórii množín sa zvykne nazývať naivná teória množín – na rozdiel od axiomatickej teórie množín, ktorá systematicky definuje pojem množiny pomocou niekoľkých základných axiém.) Navyše, všetky množiny, s ktorými sa budeme stretávať budú množina komplexných čísel a rôzne jej podmnožiny (ako napríklad  $\mathbb{R}$ ,  $\mathbb{Z}$ ,  $\mathbb{N}$ ). Tieto množiny poznáte zo strednej školy a mali by ste o nich mať dobrú intuitívnu predstavu, takže si až tak veľmi nemusíme robiť starosti s tým, že si celkom presne nevyvetlíme, čo sa rozumie pod pojmom množina.

Pre naše účely stačí množinu chápať ako súhrn nejakých prvkov. Príčom prvky budú najčastejšie čísla, niekedy aj množiny alebo zobrazenia. A takisto sa budeme stretávať s množinami, ktoré sa dajú z množín čísel vytvoriť pomocou množinových operácií ako sú napríklad zjednotenie alebo karteziánsky súčin.

Každá množina je určená svojimi prvkami. Inak povedané, dve množiny sa rovnajú, ak majú rovnaké prvky.

**Definícia 2.2.1.** Vzťah byť prvok množiny zapisujeme ako  $x \in A$ , čítame „ $x$  patrí  $A$ .“

Hovoríme, že množiny  $A$  a  $B$  sa *rovnajú* (označujeme  $A = B$ ), ak platí

$$(x \in A) \quad \Leftrightarrow \quad (x \in B)$$

pre ľubovoľný prvok  $x$ .

Množiny, ktorá nemá nijaké prvky nazývame *prázdna množina* a označujeme  $\emptyset$ .

To znamená, že pre nijaké  $x$  neplatí  $x \in \emptyset$ .

Ďalej pripomenieme niektoré základné vzťahy a operácie s množinami. (Opäť ide o opakovanie – pravdepodobne ste o nich už počuli.)

**Definícia 2.2.2.** Hovoríme, že  $A$  je *podmnožinou*  $B$ , ak každý prvok množiny  $A$  patrí aj do  $B$ , označujeme  $A \subseteq B$ . Inak povedané,  $A \subseteq B$  ak pre každé  $x$  platí

$$(x \in A) \quad \Rightarrow \quad (x \in B).$$

Vzťah množín  $A$  a  $B$ , pre ktoré platí  $A \subseteq B$  sa tiež zvykne nazývať *inklúzia*.

Inklúziu budeme často používať pri dôkaze rovnosti nejakých množín. Platí totiž

$$A = B \quad \Leftrightarrow \quad (A \subseteq B) \wedge (B \subseteq A).$$

(Vyplýva to z tautológie uvedenej v cvičení 2.1.1b) v časti 2.1. Ak totiž za výroky vystupujúce v tejto tautológii dosadíme  $x \in A$  a  $x \in B$ , tak dostaneme, že tvrdenie  $(x \in A) \Leftrightarrow (x \in B)$ ,

čo je presne rovnosť množín  $A$  a  $B$ , je ekvivalentné s tvrdením  $[(x \in A) \Rightarrow (x \in B)] \wedge [(x \in B) \Rightarrow (x \in A)]$ , čo môžeme skrátene zapísať  $(A \subseteq B) \wedge (B \subseteq A)$ .

Pripomenieme si teraz niekoľko spôsobov, ako môžeme z daných množín vytvárať nové množiny.

Často budeme definovať množiny zápisom tvaru

$$\{x \in A; P(x)\},$$

ktorý znamená množinu všetkých tých prvkov z  $A$ , pre ktoré platí výrok  $P(x)$ . (Pričom  $A$  je nejaká vopred daná množina.) Napríklad z množiny prirodzených čísel  $\mathbb{N}$  môžeme vybrať párne čísla  $E = \{n \in \mathbb{N}; n \text{ je deliteľné číslom } 2\}$ .

Zo strednej školy poznáte základné operácie s množinami – prienik, zjednotenie a rozdiel množín – pripomeňme si však ich definície. Použijeme pri nich práve typ zápisu, ktorý sme pred chvíľou spomínali.

**Definícia 2.2.3.** *Zjednotenie* dvoch množín  $A$  a  $B$  je množina

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

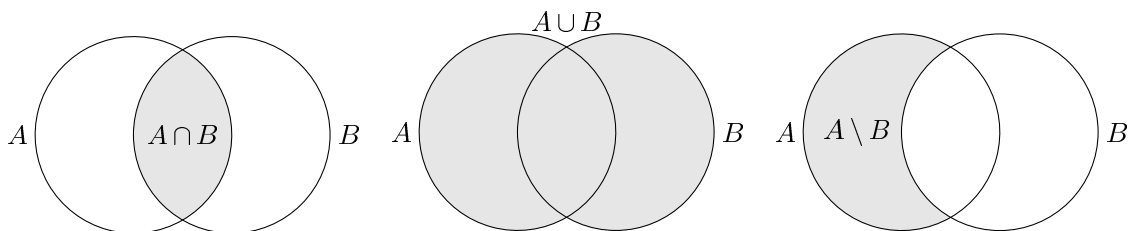
*Prienik* dvoch množín  $A$  a  $B$  je množina

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

*Rozdiel* dvoch množín  $A$  a  $B$  je množina

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

Operácie s množinami znázorňujeme pomocou *Vennových diagramov* (obr. 2.1).



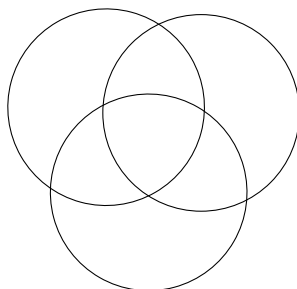
Obr. 2.1: Operácie s množinami

Keďže množiny často definujeme pomocou nejakého výroku, ktorý majú spĺňať všetky prvky množiny, dajú sa operácie s množinami chápať aj ako iný spôsob vyjadrovania o výrokoch. Aj identity s množinami môžeme overovať tak, že pracujeme s výrokmi typu  $x \in A$ . Iný spôsob je použiť Vennove diagramy – v tom prípade je potrebné nakresliť si množiny vo všeobecnej (alebo tiež generickej polohe) – tak, aby sme na diagrame mali body pre každú možnú kombináciu pravdivostných hodnôt výrokov  $x \in A$ ,  $x \in B$  atď.

Často budeme používať aj zjednotenie a prienik nekonečného počtu množín. Ak  $\{A_i; i \in I\}$  je nejaký systém množín (oindexovaný prvkami množiny  $I$ ), tak používame označenia

$$\bigcup_{i \in I} A_i = \{x; (\exists i \in I) x \in A_i\};$$

$$\bigcap_{i \in I} A_i = \{x; (\forall i \in I) x \in A_i\}.$$



Obr. 2.2: Generická poloha

(Pri prieniku navyše požadujeme, aby  $I \neq \emptyset$ ; prienik prázdneho systému množín nedefinujeme.) V prípade, že indexová množina je  $I = \{1, 2, \dots\}$ , budeme používať označenie  $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$  resp.  $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n$ .

Bude pre nás dôležité ešte jedna operácia s množinami – karteziánsky súčin.

**Definícia 2.2.4.** Ak  $A, B$  sú množiny, tak ich *karteziánsky súčin* je množina všetkých usporiadaných dvojíc  $(a, b)$  takých, že  $a \in A$  a  $b \in B$ . Označujeme ho

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

Hoci pojem *usporiadaná dvojica* sme nedefinovali, malo by byť intuitívne jasné, čo sa ním myslí. Slovíčko *usporiadaná* je v názve preto, že záleží na poradí. Usporiadanú dvojicu prvkov  $a$  a  $b$  budeme označovať  $(a, b)$ .

Napríklad

$$\{0, 1\} \times \{0, 1\} = \{(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)\}$$

a dvojice  $(0, 1)$  a  $(1, 0)$  považujeme za rôzne. (Oproti tomu, množiny  $\{0, 1\}$  a  $\{1, 0\}$  sú rovnaké – pretože pri množinách záleží len na tom, ktoré prvky tam patria.)

## 2.2.2 Zobrazenia

Pod zobrazením z množiny  $X$  do množiny  $Y$  rozumieme akýkoľvek predpis, ktorý každému prvku množiny  $X$  priradí jediný prvok množiny  $Y$ . Formálne môžeme zobrazenie zdefinovať nasledovne:

**Definícia 2.2.5.** *Zobrazenie*  $f: X \rightarrow Y$  z množiny  $X$  do množiny  $Y$  je podmnožina  $f$  množiny  $X \times Y$  taká, že ku každému  $x \in X$  existuje práve jedno  $y \in Y$  s vlastnosťou  $(x, y) \in f$ .

Množinu  $X$  budeme tiež nazývať *definičný obor* zobrazenia  $f$  a množina  $Y$  je *obor hodnôt* zobrazenia  $f$ .

Namiesto zápisu  $(x, y) \in f$  budeme používať zápis  $y = f(x)$ .

Podmienka, že ku každému  $x \in X$  existuje práve jedno  $y \in Y$ , je presne formalizáciou toho, čo chápeme pod priradením (jediného) prvku  $y = f(x)$  každému prvku  $x \in X$ .

Poznamenajme, že (podobne ako pri mnohých ďalších označeniach) pri použití inej literatúry je často nutné skontrolovať, či sa zhodujú použité definície. (V prípadoch, keď sa

budeme hovoriť o pojmoch a označeniach, ktoré sa často zvyknú v matematickej literatúre líšiť, na to vždy upozorníme.)

V tomto prípade je vhodné spomenúť, že [KGGs] používa namiesto  $y = f(x)$  zápis  $y = xf$ . (V súvislosti so zobrazeniami sa v [KGGs] vyskytujú aj ďalšie odlišnosti, ku ktorým sa o chvíľu dostaneme.)

**Príklad 2.2.6.** Uvedieme niekoľko príkladov zobrazení.

$$f_1: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, f_1(n) = 2n + 1$$

$$f_2: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, f_2(n) = 2n$$

$$f_3: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, f_3(n) = \begin{cases} n + 1, & \text{ak } n \text{ je párne} \\ n - 1, & \text{ak } n \text{ je nepárne} \end{cases}$$

$$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = x \cdot \sin x$$

$$g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, g(x) = \sin x$$

$$h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, h(x) = x^2$$

**Definícia 2.2.7.** Hovoríme, že dve zobrazenia  $f: X \rightarrow Y$  a  $g: Z \rightarrow W$  sa *rovnajú*, ak  $X = Z$ ,  $Y = W$  a  $f(x) = g(x)$  pre každé  $x \in X$ . (Inými slovami, ak sa rovnajú ich definičné obory, obory hodnôt a obe zobrazenia nadobúdajú v každom bode rovnakú hodnotu.) Rovnosť zobrazení označujeme  $f = g$ .

**Príklad 2.2.8.** Dve zobrazenia sa môžu rovnať aj keď sú zapísané iným zápisom. Napríklad zobrazenia  $k, l: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  určené predpismi  $k(x) = \sin^2 x + \cos^2 x$  a  $l(x) = 1$  sa rovnajú.

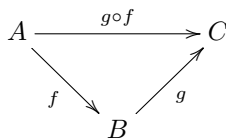
O celkom zaujímavom vývoji pojmu zobrazenia v histórii teórie množín sa viac môžete dozvedieť napríklad v úvodnej kapitole knihy [BŠ].

V tejto kapitole ešte zavedieme ďalšie dôležité pojmy, ako sú skladanie zobrazení, bijektívne, injektívne a surjektívne zobrazenia.

**Definícia 2.2.9** (Skladanie zobrazení). Ak  $f: X \rightarrow Y$ ,  $g: Y \rightarrow Z$  sú zobrazenia, tak *zložením zobrazení  $f$  a  $g$*  nazývame zobrazenie  $g \circ f: X \rightarrow Z$  také, že pre každé  $x \in X$  platí

$$g \circ f(x) = g(f(x)).$$

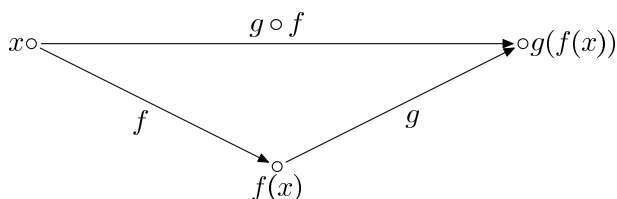
Zobrazenia môžeme skladať iba vtedy, keď obor hodnôt prvého zobrazenia je rovnaký ako definičný obor druhého zobrazenia.



Ak si predstavíme zobrazenia ako šípku smerujúcu od  $x$  ku  $f(x)$ , tak skladanie zobrazení znamená, že z  $x$  prejdeme najprv po šípke  $f$  a potom po šípke  $g$ , čiže sa dostaneme do  $g(f(x))$ . Táto predstava o skladaní zobrazení je znázornená na obrázku 2.3.

Napríklad pre funkcie  $g$  a  $h$  z príkladu 2.2.6 dostaneme  $h \circ g(x) = \sin^2 x$  a  $g \circ h(x) = \sin x^2$ . Vidíme, že pre zobrazenia  $g, h: A \rightarrow A$  vo všeobecnosti neplatí  $g \circ h = h \circ g$ .

**POZOR!!!** V niektorej literatúre (napríklad v [KGGs]) nájdete skladanie zobrazení definované v opačnom poradí (t.j.  $g \circ f(x) = f(g(x))$ ), my ho budeme používať tak, ako sme ho zaviedli v definícii 2.2.9. (Na prvý pohľad vyzerá zápis  $g \circ f(x) = f(g(x))$  nelogicky; môžeme ho chápať tak, že píšeme zobrazenia v takom poradí, ako sa skladajú. Ak by ste sa pozreli



Obr. 2.3: Skladanie zobrazení

do [KGGS], zistili by ste, že namiesto  $f(x)$  používajú autori zápis  $xf$ . Pri takomto označení je skutočne logickejší zápis  $x(g \circ f) = (xg)f$ .<sup>4</sup>

Teraz dokážeme veľmi dôležitú vlastnosť skladania zobrazení.

**Tvrdenie 2.2.10** (Asociatívnosť skladania zobrazení). *Nech  $f: X \rightarrow Y$ ,  $g: Y \rightarrow Z$ ,  $h: Z \rightarrow W$  sú zobrazenia, potom*

$$(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f).$$

*Dôkaz.* Obe zobrazenia, ktoré porovnáваме, sú zobrazenia z množiny  $X$  do množiny  $W$ . Majú teda rovnaké definičné obory i obory hodnôt.

Zostáva nám teda overiť, či nadobúdajú rovnaké hodnoty. To zistíme jednoduchým výpočtom:

$$\begin{aligned} ((h \circ g) \circ f)(x) &= (h \circ g)(f(x)) = h(g(f(x))) \\ (h \circ (g \circ f))(x) &= h((g \circ f)(x)) = h(g(f(x))) \end{aligned}$$

□

V ďalších častiach tejto prednášky budú dosť dôležité typy zobrazení, ktoré teraz zdefiniujeme.

**Definícia 2.2.11.** Nech  $f: X \rightarrow Y$  je zobrazenie. Hovoríme, že  $f$  je *injektívne (prosté) 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 zobrazenie*, *zobrazenie na*), ak pre každé  $y \in Y$  existuje také,  $x \in X$ , že  $f(x) = y$ .

Hovoríme, že  $f$  je *bijekcia* (*bijektívne zobrazenie*), ak  $f$  je súčasne injekcia aj surjekcia.

Ekvivalentná definícia injekcie by bola, ak by sme namiesto

$$x \neq y \Rightarrow f(x) \neq f(y)$$

uvažovali podmienku

$$f(x) = f(y) \Rightarrow x = y.$$

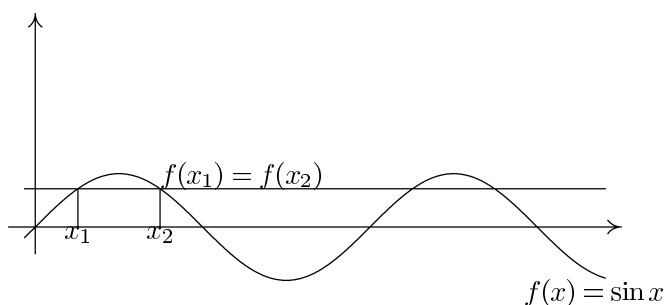
(Lebo výroky  $P \Rightarrow Q$  a  $\neg Q \Rightarrow \neg P$  sú ekvivalentné, pozri príklad 2.1.11.)

Definíciu surjektívneho zobrazenia by sme mohli preformulovať tak, že každá hodnota  $y$  z oboru hodnôt  $Y$  sa nadobúda v aspoň jednom bode definičného oboru.

<sup>4</sup>Pravdepodobne si budete musieť zvyknúť na to, že na rôznych prednáškach sa stretnete s rozličnými spôsobmi označenia; napríklad pri skladaní zobrazení ale aj pri ďalších iných veciach. Ja som zvolil používanie poradia skladania tak, aby bolo rovnaké s definíciou skladania zobrazení, ktorú používate na prednáške z matematickej analýzy v prvom ročníku – teda aby ste nemali problém s používaním 2 rozličných označení počas toho istého ročníka.



Z grafu zobrazenia  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  môžeme jednoducho vyčítať, či ide o injekciu alebo surjekciu. Stačí sa pozrieť na vodorovné priamky – rovnobežné s osou  $x$ . Zobrazenie je injektívne, ak každá takáto priamka pretína graf funkcie najviac raz (pozri Obr. 2.4). Zobrazenie je surjektívne, ak každá takáto priamka pretína graf funkcie aspoň raz. Zobrazenie je bijektívne, ak každá takáto priamka pretína graf funkcie práve raz.



Obr. 2.4: Ak vodorovná priamka pretne graf v 2 bodoch, zobrazenie nie je injektívne

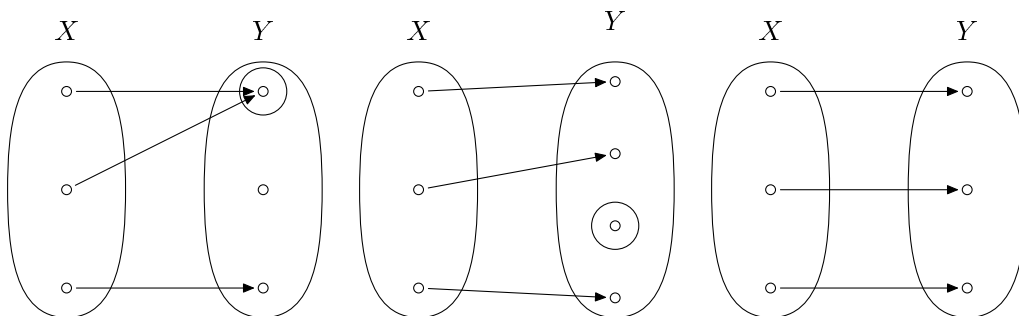
**Príklad 2.2.12.** Zobrazenie  $f(x) = \sin x$ ,  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  nie je ani surjektívne ani injektívne. (Napríklad  $f(0) = f(\pi) = f(2\pi) = 0$ , preto  $f$  nie je injektívne. Hodnota  $2 \in \mathbb{R}$  sa nenadobúda v žiadnom bode.)

Ak však zmeníme obor hodnôt  $g(x) = \sin x$ ,  $g: \mathbb{R} \rightarrow \langle -1, 1 \rangle$ , dostaneme už surjektívne zobrazenie.

Zobrazenie  $h(x) = \sqrt{x}$ ,  $h: \langle 0, \infty \rangle \rightarrow \mathbb{R}$  je injektívne. Opäť, ak by sme zmenili obor hodnôt, dostaneme surjektívne zobrazenie  $j(x) = \sqrt{x}$ ,  $j: \langle 0, \infty \rangle \rightarrow \langle 0, \infty \rangle$ . Zobrazenie  $j$  je bijekcia (je injektívne aj surjektívne.)

Iným príkladom bijektívneho zobrazenia je  $k: \langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \rangle \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $k(x) = \operatorname{tg} x$ .

Opäť si môžeme pomôcť predstavou zobrazení ako šípok. Zobrazenie je injekcia, ak nenastane situácia znázornená na ľavom obrázku v 2.5, keď sa viaceré šípky stretnú v jednom bode. O surjekciu ide vtedy, ak do každého bodu ide aspoň jedna šípka, čiže nenastane situácia znázornená na prostrednom obrázku. V prípade bijekcie ide z každého prvku  $x$  jediná šípka do jediného bodu  $y$ , teda bijekcia určuje jedno-jednoznačné priradenie medzi prvkami.



Obr. 2.5: Ilustrácia injekcie, surjekcie a bijekcie

**Tvrdenie 2.2.13.** Zloženie dvoch injekcií je injekcia, zloženie dvoch surjekcií je surjekcia, zloženie dvoch bijekcií je bijekcia.

*Dôkaz.* Dané zobrazenia označme  $f: X \rightarrow Y$ ,  $g: Y \rightarrow Z$ .

Najprv predpokladajme, že  $f$  aj  $g$  sú injekcie. Nech ďalej  $x, y \in X$  majú tú vlastnosť, že

$$(g \circ f)(x) = (g \circ f)(y).$$

Túto rovnosť môžeme prepísať ako

$$g(f(x)) = g(f(y)).$$

Pretože  $g$  je injekcia, vyplýva z tejto rovnosti

$$f(x) = f(y).$$

Opäť použitím definície injekcie, ale tentokrát pre zobrazenie  $f$ , dostaneme

$$x = y.$$

Dokázali sme implikáciu  $(g \circ f)(x) = (g \circ f)(y) \Rightarrow x = y$ , teda  $g \circ f$  je skutočne injekcia.

Teraz nech  $f$  aj  $g$  sú surjekcie. Máme dokázať, že ku každému  $z \in Z$  existuje  $x_0 \in X$  také, že  $g(f(x_0)) = z$ . Z toho, že  $g$  je surjekcia, vieme, že existuje  $y_0 \in Y$  také, že  $g(y_0) = z$ . Podobne (pretože  $f$  je surjekcia), k tomuto  $y_0$  vieme nájsť  $x_0$  také, že  $f(x_0) = y_0$ . Spojením týchto dvoch rovností ale dostaneme

$$g(f(x_0)) = g(y_0) = z,$$

teda sme skutočne našli  $x_0$ , ktoré sa zobrazením  $g \circ f$  zobrazí na  $z$ .

Posledná časť tvrdenia (ktorá hovorí o skladaní bijekcií) ľahko vyplýva z prvých dvoch častí.  $\square$

Ak chcete lepšie porozumieť predchádzajúcemu dôkazu (alebo sa pokúšate dokázať si toto tvrdenie samostatne), opäť môže byť užitočné pomôcť si kreslením šípok.

**Definícia 2.2.14.** Zobrazenie  $id_X: X \rightarrow X$  také, že  $id_X(x) = x$  pre každé  $x \in X$  sa nazýva *identické zobrazenie (identita)*.

Všimnime si, že pre ľubovoľné zobrazenie  $f: X \rightarrow Y$  platí

$$f \circ id_X = f \quad \text{a} \quad id_Y \circ f = f.$$

**Definícia 2.2.15.** Nech  $f: X \rightarrow Y$  a  $g: Y \rightarrow X$  sú zobrazenia. Ak platí

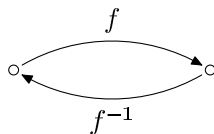
$$\begin{aligned} g \circ f &= id_X \\ f \circ g &= id_Y \end{aligned}$$

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

Ak k nejakému zobrazeniu existuje inverzné zobrazenie, tak takéto zobrazenie je jediné (úloha 2.2.5). Vďaka tejto jednoznačnosti má zmysel zaviesť označenie pre inverzné zobrazenie – znak  $f^{-1}$  skutočne označuje len jediné konkrétne zobrazenie.

Vzťahy definujúce inverzné zobrazenie môžeme ekvivalentne prepísať aj tak, že pre každé  $x \in X$  a pre každé  $y \in Y$  platí

$$\begin{aligned} f^{-1}(f(x)) &= x, \\ f(f^{-1}(y)) &= y. \end{aligned}$$



Obr. 2.6: Inverzné zobrazenie

V zmysle našej intuície o zobrazení ako systéme šípok vychádzajúcich z každého prvku  $x$ , zodpovedá inverzné zobrazenie šípkam idúcim opačným smerom (obr. 2.6).

Aby takéto zobrazenie existovalo, do každého prvku  $y$  musí ísť aspoň jedna šípka (aby sme sa mali kam vrátiť) a do žiadneho prvku  $y$  nesmie ísť viac ako jedna šípka (aby sme dostali zobrazenie, t.j. len jediný prvok, do ktorého sa vraciame.) Tento fakt je sformulovaný v nasledujúcom tvrdení.

**Tvrdenie 2.2.16.** *Inverzné zobrazenie  $k$   $f$  existuje práve vtedy, keď  $f$  je bijekcia.*

*Dôkaz.*  $\Rightarrow$  Predpokladajme, že existuje inverzné zobrazenie  $k$  zobrazeniu  $f: X \rightarrow Y$ , označme ho  $g$ . Z definície inverzného zobrazenia dostaneme

$$f(x_1) = f(x_2) \Rightarrow g(f(x_1)) = g(f(x_2)) \Rightarrow g \circ f(x_1) = g \circ f(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2,$$

čo znamená, že  $f$  je prosté.

Ešte potrebujeme ukázať, že ku každému  $y \in Y$  existuje  $x_0 \in X$  s vlastnosťou  $f(x_0) = y$ . Stačí zvoliť  $x_0 = g(y)$ , pretože (opäť podľa definície inverzného zobrazenia)

$$f(x_0) = f(g(y)) = y.$$

$\Leftarrow$  Predpokladajme, že  $f: X \rightarrow Y$  je bijekcia, chceme dokázať, že existuje inverzné zobrazenie  $g: Y \rightarrow X$ . Majme ľubovoľné  $y \in Y$ . Pretože  $f$  je surjekcia, existuje aspoň jedno  $x \in X$  také, že  $f(x) = y$ . Pretože  $f$  je injekcia, existuje najviac jedno také  $x$  – celkove teda dostávame, že existuje práve jedno  $x$  s touto vlastnosťou. Zobrazenie  $g$  teda môžeme definovať tak, že  $g(y)$  je práve ten prvok  $x$ , pre ktorý platí  $f(x) = y$ . Inak povedané,  $g$  je určené podmienkou

$$g(y) = x \Leftrightarrow f(x) = y.$$

Ak zobrazenie  $g$  definujeme takýmto spôsobom dostaneme

$$g(f(x)) = x$$

(lebo  $g(f(x))$  je práve ten prvok, ktorý sa zobrazí na  $f(x)$ , čo je presne prvok  $x$ ) a

$$f(g(y)) = y$$

(lebo  $g(y)$  sa, podľa definície zobrazenia  $g$ , zobrazí na  $y$ .)  $\square$

Ukážeme si ešte jeden dôkaz jednej implikácie z predchádzajúceho tvrdenia. (Je to v podstate ten istý dôkaz, inak formulovaný.) Inverzné zobrazenie tu dostaneme tak, že vymeníme poradie vo všetkých usporiadaných dvojiciach patriacich do  $f$ . Toto zodpovedá predstave o tom, že otáčame jednotlivé šípky (zodpovedá to výmene poradia) a takisto geometrickej predstave, ktorú poznáte ešte zo strednej školy, keď ste inverzné zobrazenie získali symetrickým zobrazením grafu funkcie podľa osi  $y = x$ .

*Iný dôkaz implikácie  $\square$ .* Predpokladáme, že  $f: X \rightarrow Y$  je bijekcia, chceme ukázať, že existuje inverzné zobrazenie  $g: Y \rightarrow X$ .

Položme

$$g := \{(y, x); (x, y) \in f\} = \{(y, x); y = f(x), x \in X\} = \{(f(x), x); x \in X\}.$$

Očividne je  $g$  podmnožinou karteziánskeho súčinu  $Y \times X$ . Najprv si uvedomme, že  $g$  je skutočne zobrazenie z  $Y$  do  $X$ .

Pretože  $f$  je súčasne injekcia a surjekcia, pre každé  $y \in Y$  existuje práve jedno  $x \in X$  také, že  $y = f(x)$ , resp.  $(x, y) \in f$ .

Máme teda zobrazenie  $g: Y \rightarrow X$ . Priamo z jeho definície vyplýva platnosť ekvivalencie

$$g(y) = x \quad \Leftrightarrow \quad y = f(x),$$

z ktorej rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom dôkaze dostaneme, že  $g$  je inverzné zobrazenie k zobrazeniu  $f$ .  $\square$

**Tvrdenie 2.2.17.** *Nech  $f: X \rightarrow Y$  a  $g: Y \rightarrow Z$  sú bijekcie. Potom*

$$\begin{aligned} (f^{-1})^{-1} &= f \\ (g \circ f)^{-1} &= f^{-1} \circ g^{-1} \end{aligned}$$

Všimnime si, že v predpokladoch máme, že  $f$  aj  $g$  sú bijekcie. Teda z tvrdenia 2.2.16 vieme, že existujú inverzné zobrazenia  $f^{-1}$  a  $g^{-1}$ . (Vďaka tomu môžeme o nich hovoriť; ak by neexistovali, tak uvedené tvrdenie by vôbec nemalo zmysel.)

*Dôkaz.* Použitím definície inverzného zobrazenia pre zobrazenie  $f$  máme  $f^{-1} \circ f = id_X$  a  $f \circ f^{-1} = id_Y$ . To ale presne hovorí, že  $f$  je inverzné zobrazenie k  $f^{-1}$ .

Podobne vidíme, že

$$(f^{-1} \circ g^{-1}) \circ (g \circ f) = f^{-1} \circ (g^{-1} \circ g) \circ f = f^{-1} \circ id_Y \circ f = f^{-1} \circ f = id_X.$$

Analogickým spôsobom overíme, že  $(g \circ f) \circ (f^{-1} \circ g^{-1}) = id_Z$ . Tým sme vlastne overili obe podmienky z definície inverzného zobrazenia k  $g \circ f$ .  $\square$

**Dôsledok 2.2.18.** *Ak  $f$  je bijekcia, tak aj  $f^{-1}$  je bijekcia.*

### 2.2.3 Vzor a obraz množiny\*

**Definícia 2.2.19.** Nech  $f: X \rightarrow Y$  je zobrazenie,  $A \subseteq X$ ,  $B \subseteq Y$ . Množinu

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

nazývame *obrazom* množiny  $A$  v zobrazení  $f$ . Množinu

$$f^{-1}(B) = \{x \in X; f(x) \in B\}$$

nazývame *vzorom* množiny  $B$  v zobrazení  $f$ .

**Cvičenia**

**Úloha 2.2.1.** Dokážte: Ak  $g \circ f$  je surjekcia, tak aj  $g$  je surjekcia. Platí aj opačná implikácia? Musí byť  $f$  surjekcia?

**Úloha 2.2.2.** Dokážte: Ak  $g \circ f$  je injekcia, tak  $f$  je injekcia.

**Úloha 2.2.3.** Dokážte: Ak  $g \circ f$  je bijekcia, tak  $f$  je injekcia a  $g$  je surjekcia.

**Úloha 2.2.4.** Nech  $f: X \rightarrow Y$  je zobrazenie a  $X \neq \emptyset$  (t.j.  $X$  je neprázdna množina). Potom:

a)  $f$  je injekcia práve vtedy, keď existuje  $g$  také, že  $g \circ f = id_X$ .

b)  $f$  je surjekcia práve vtedy, keď existuje  $h$  také, že  $f \circ h = id_Y$ .

c) K zobrazeniu  $f$  existuje inverzné zobrazenie práve vtedy, keď  $f$  je bijekcia. (Tým sme znovu dokázali tvrdenie 2.2.16.)

**Úloha 2.2.5.** Nech  $f: X \rightarrow Y$ ,  $g: Y \rightarrow X$ ,  $h: Y \rightarrow X$  sú zobrazenia. Ak  $g$  aj  $h$  sú inverzné zobrazenia k  $f$ , tak  $g = h$ .

**Úloha 2.2.6.** Nech  $M$ ,  $N$  sú konečné množiny,  $M$  má  $m$  prvkov a  $N$  má  $n$  prvkov. Koľko existuje zobrazení množiny  $M$  do množiny  $N$ ?

**Úloha 2.2.7.** Nech  $A$  je konečná množina a  $f: A \rightarrow A$  je zobrazenie. Dokážte:

a) Ak  $f$  je injekcia, tak  $f$  je bijekcia.

b) Ak  $f$  je surjekcia, tak  $f$  je bijekcia.

**Úloha 2.2.8.** Dokážte: Zobrazenie  $f: X \rightarrow Y$  je surjekcia práve vtedy, keď pre každú množinu  $Z$  a všetky zobrazenia  $g, h: Y \rightarrow Z$  platí: Ak  $g \circ f = h \circ f$ , tak  $g = h$ .

**Úloha 2.2.9.** Dokážte: Zobrazenie  $f: X \rightarrow Y$  je injekcia práve vtedy, keď pre každú množinu  $Z$  a všetky zobrazenia  $g, h: Z \rightarrow X$  platí: Ak  $f \circ g = f \circ h$ , tak  $g = h$ .

**Úloha 2.2.10<sup>+</sup>.** Dokážte:  $f[A \cup B] = f[A] \cup f[B]$ ,  $f^{-1}(A \cup B) = f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B)$ .

**Úloha 2.2.11<sup>+</sup>.** Ktoré z nasledujúcich tvrdení platia a ktoré neplatia? Zdôvodnite.

a)  $f[A \cap B] = f[A] \cap f[B]$

b)  $f[A \cap B] \subset f[A] \cap f[B]$

c)  $f[A \cap B] \supset f[A] \cap f[B]$

d)  $f^{-1}(A \cap B) = f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B)$

e)  $f^{-1}(A \cap B) \subset f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B)$

f)  $f^{-1}(A \cap B) \supset f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B)$

g)  $f[f^{-1}(B)] = B$

h)  $f[f^{-1}(B)] \subset B$

i)  $f^{-1}(f[A]) = A$

j)  $f^{-1}(f[A]) \subset A$

k)  $g \circ f[A] = g[f[A]]$

**Úloha 2.2.12<sup>+</sup>.** Ak  $X$  je množina, tak  $P(X)$  budeme označovať množinu všetkých jej podmnožín. Nech  $f: X \rightarrow Y$  je zobrazenie a  $g: P(X) \rightarrow P(Y)$  je zobrazenie definované tak, že  $g(A) = f[A]$  pre ľubovoľnú podmnožinu  $A \subseteq X$ . Dokážte, že  $f$  je prosté práve vtedy, keď  $g$  je prosté.

**2.3 Permutácie**

V tejto podkapitole sa budeme zaoberať istým typom zobrazení, ktorý budeme v ďalších častiach využívať.

**Definícia 2.3.1.** Ak  $M$  je konečná množina, tak bijekciu  $\varphi: M \rightarrow M$  budeme nazývať *permutáciou* množiny  $M$ .

My sa budeme zaoberať (pre zjednodušenie) len permutáciami množiny  $\{1, 2, \dots, n\}$ , kde  $n$  je prirodzené číslo. (Každú konečnú množinu  $M$  vieme očíslovať číslami od 1 po  $n$ , kde  $n$  je počet prvkov množiny  $M$ .)

Zo strednej školy (z kombinatoriky) poznáte termín permutácia v zmysle preusporiadanie nejakej (konečnej) množiny. Je to v istom zmysle, to isté, čo definujeme tu – zobrazenie z množiny  $\{1, 2, \dots, n\}$  vlastne určuje nejaké poradie prvkov tejto množiny, čiže skutočne zodpovedá nejakému jej preusporiadaniu.

Nie je ťažké si uvedomiť, že počet permutácií množiny  $\{1, \dots, n\}$  je práve  $n! = n \cdot (n - 1) \cdot (n - 2) \cdots 2 \cdot 1$ . Máme totiž práve  $n$  možností, ako môžeme vybrať prvok  $\varphi(1)$ . Pri výbere prvku  $\varphi(2)$  však už nemôžeme použiť ten istý prvok ako v prvom prípade (inak by zobrazenie  $\varphi$  nebolo injektívne), teda nám zostáva práve  $(n - 1)$  možností. Pre výber obrazu ďalšieho prvku je už iba  $(n - 2)$  možností, atď.

Permutáciu  $\varphi: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$  budeme zapisovať v tvare

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \varphi(1) & \varphi(2) & \dots & \varphi(n) \end{pmatrix},$$

čiže pod každé číslo  $1, 2, \dots, n$  zapíšeme jeho obraz v permutácii  $\varphi$ .

Napríklad permutáciu na množine  $\{1, 2, 3\}$ , pre ktorú  $\varphi(1) = 1$ ,  $\varphi(2) = 3$  a  $\varphi(3) = 2$  zapíšeme ako  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$ , identickú permutáciu zapíšeme ako  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$ . (Budeme ju tiež označovať *id*, keďže ide o identické zobrazenie.)

Niekedy sa kvôli stručnosti používa označenie, kde sa vynechá prvý riadok obsahujúci čísla  $1, 2, \dots, n$ . (Napríklad [Bó] používa iba jednoriadkové označenie. Väčšina kníh s touto tématikou používa jednoriadkový aj dvojriadkový zápis – podľa toho, ktorý sa práve hodí.) My sa budeme pridrižovať označenia, ktoré sme zaviedli, z toho dôvodu, že spomínané zjednodušenie by sa mohlo pliesť s označením pre cykly, o ktorých sa viac dozviete neskôr.

Ďalšou výhodou dvojriadkového zápisu je, že ho môžeme použiť pre ľubovoľnú množinu – jednoriadkový zápis môžeme použiť ak máme na množine  $M$  nejaké prirodzené usporiadanie, vďaka ktorému vieme prvý riadok jednoznačne doplniť.

Z tvrdenia 2.2.13 vyplýva, že zložením dvoch permutácií opäť dostaneme permutáciu. Pri skladaní permutácií (a takisto pri skladaní zobrazení) budeme často vynechávať znak  $\circ$ , teda píšeme  $\varphi\tau$  namiesto  $\varphi \circ \tau$ .

Ak napríklad  $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$ , tak  $\varphi\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$ ,  $\tau\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$ . Vidíme, že skladanie permutácií vo všeobecnosti nie je komutatívne.

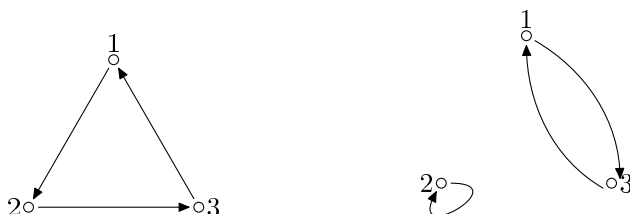
Skladanie permutácií  $\varphi\tau$  si môžeme predstaviť tak, že ľavú permutáciu napíšeme pod pravú a preusporiadame stĺpce dolnej permutácie tak, aby jednotlivé čísla súhlasili.

$$\begin{array}{ccc} \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} & \longrightarrow & \tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} & \longrightarrow & \varphi\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \\ \varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} & & \varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} & & \end{array}$$

Permutácie  $\varphi$  a  $\tau$  sú znázornené na obrázku 2.7.

To isté môžeme inak vyjadriť tak, že čísla, ktoré sú v dolnom riadku v zápise ľavej permutácie, napíšeme do dolného riadku výslednej permutácie v takom poradí, aké udáva pravá permutácia (tretie, druhé, prvé). Čiže číslo 3, ktoré je na prvom mieste v permutácii  $\tau$  udáva, že na prvom mieste vo  $\varphi\tau$  permutácii bude tretie číslo z  $\varphi$ , čiže 1, 2 na druhom mieste v  $\tau$  určuje, že na druhom mieste bude to, čo je na druhom mieste vo  $\varphi$ , t.j. 2 a posledná jednotka určuje, že na treťom mieste má byť 2.

Pozor!!! V [KGS] je skladanie zobrazení (a teda aj skladanie permutácií) definované v opačnom poradí, ako sme ho definovali my.

Obr. 2.7: Permutácie  $\tau$  a  $\varphi$ 

Inverzné zobrazenie k permutácii je permutácia. Vypočítať ju môžeme jednoducho takým spôsobom, že vymeníme riadky a preusporiadame stĺpce do požadovaného tvaru. Z  $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$  tak dostaneme

$$\varphi^{-1} = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Ak  $\varphi$  je permutácia, tak namiesto  $\varphi \circ \varphi$  budeme písať  $\varphi^2$  a podobne namiesto  $\underbrace{\varphi \circ \dots \circ \varphi}_{n\text{-krát}}$  používame  $\varphi^n$ .

Matematicky správnejšie by bolo povedať, že  $\varphi^n$  definujeme matematickou indukciou:

$$1^\circ \varphi^0 = id, \varphi^1 = \varphi$$

$$2^\circ \varphi^{n+1} = \varphi \circ \varphi^n.$$

**Príklad 2.3.2.** Uvažujme permutáciu  $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 4 & 2 \end{pmatrix}$  množiny  $\{1, 2, 3, 4\}$ . Pokúsme sa vypočítať permutáciu  $\varphi^{50}$ .

Lahko zistíme, že

$$\begin{aligned} \varphi^1 &= \varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 4 & 2 \end{pmatrix} \\ \varphi^2 &= \varphi \circ \varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 3 \end{pmatrix} \\ \varphi^3 &= \varphi \circ \varphi^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Ďalšími výpočtami by sme zistili, že sa stále budú opakovať tieto 3 permutácie. (Môžeme to dokázať matematickou indukciou.) Z toho dostaneme  $\varphi^{50} = \varphi^{3 \cdot 16 + 2} = \varphi^2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 3 \end{pmatrix}$ . (Vlastne sme využili vzťah  $\varphi^{m \cdot n} = (\varphi^m)^n$ , ktorého dôkaz sme ponechali ako cvičenie v úlohe 2.3.4.)

### Cvičenia

**Úloha 2.3.1.** Uvažujme o permutáciach na množine  $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ . Aká je inverzná permutácia ku:  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 3 & 4 & 2 & 5 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 5 & 4 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 1 & 4 & 5 & 2 \end{pmatrix}$ ? Urobte aj skúšku správnosti, t.j. po vypočítaní  $\varphi^{-1}$  overte, či  $\varphi^{-1}\varphi = \varphi\varphi^{-1} = id$ . [ $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 4 & 2 & 3 & 5 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 5 & 4 \end{pmatrix}$ ,  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 5 & 1 & 3 & 4 \end{pmatrix}$ ]

**Úloha 2.3.2.**  $M = \{1, 2, 3, 4\}$ . Vypočítajte:  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 4 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$ . Určte inverznú permutáciu k výsledku.

**Úloha 2.3.3.** Čomu sa rovná  $\varphi^{120}$ , ak  $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 2 & 3 \end{pmatrix}$ ?

**Úloha 2.3.4.** Matematickou indukciou dokážte, že  $\varphi^{n+m} = \varphi^n \circ \varphi^m$ ,  $\varphi^{nm} = (\varphi^n)^m$ .

## Kapitola 3

# Grupy a polia

Naším cieľom je dostať sa k definícii vektorového priestoru a lineárneho zobrazenia. Ich dôležitosť je v tom, že sú vhodným aparátom na popis lineárnych javov.

Predtým nás ale čaká ešte veľmi dlhá cesta, na ktorej sa však naučíme veľmi veľa užitočných vecí. Na definíciu vektorových priestorov použijeme pojem poľa. Na definíciu poľa použijeme pojem grupy. A navyše, predtým než sa dostaneme k definícii grupy, potrebujeme uviesť niektoré základné poznatky o binárnych operáciách.

Táto dlhá cesta k definícii vektorového priestoru je cenou za to, že chceme vektorové priestory definovať v čo najväčšej obecnosti – budeme pracovať s vektorovými priestormi nad ľubovoľným poľom. Keby sme sa rozhodli pracovať iba s vektorovými priestormi nad poľom reálnych čísel, mohli by sme si túto námahu ušetriť – len by sme stručne zopakovali vlastnosti reálnych čísel a hneď by sme zadefinovali vektorový priestor. (V niektorých učebniciach sa takto aj naozaj postupuje.)

Výhoda tohoto postupu je v tom, že dostaneme všeobecnejšie výsledky. Ďalší, vôbec nie zanedbateľný, prínos je, že sa naučíte mnohé užitočné veci a zvyknete si na axiomatický prístup k definovaniu nových pojmov a dokazovaniu ich vlastností.

### 3.1 Binárne operácie

Hlavným cieľom tejto kapitoly je zdefinovať grupy a polia. Hoci najčastejšie budeme pracovať s reálnymi a komplexnými číslami, je užitočné uvedomiť si, že tvrdenia, ktoré dokážeme budú platiť pre ľubovoľné pole. Aby sme však vôbec mohli zaviesť pojmy grupa a pole, potrebujeme najprv vedieť, čo sú to binárne operácie.

**Definícia 3.1.1.** *Binárna operácia*  $*$  na množine  $A$  je zobrazenie z množiny  $A \times A$  do  $A$ .

Namiesto  $*(a, b)$  budeme používať označenie  $a * b$ , tento zápis budeme niekedy skracovať ako  $ab$ .

Opäť, podobne ako pri zobrazeniach, môžeme binárnu operáciu chápať ako predpis, ktorý však v tomto prípade priradí dvom prvkom z množiny  $A$  priradí nejaký prvok z tej istej množiny. Takisto zápis  $a * b$  resp.  $ab$  zodpovedá tomu, na čo sme zvyknutí pri binárnych operáciách, s ktorými sme sa stretli doteraz, ako je sčítanie a násobenie.

Tiež si všimnime, že v definícii vystupujú *usporiadané* dvojice (prvky množiny  $X \times Y$ ), teda výsledok operácie  $a * b$  a  $b * a$  nemusí predstavovať ten istý prvok.

**Príklad 3.1.2.** Operácie  $+$  a  $\cdot$  sú binárne operácie na množine  $\mathbb{R}$  reálnych čísel.



Operácia  $\cdot$  je binárna operácia na množine  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ , pretože nulu nemôžeme dostať ako súčin dvoch nenulových čísel. Naopak,  $+$  nie je binárna operácia na  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ , lebo  $-1 + 1 = 0$ , teda dvom číslam z množiny  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$  operácia  $+$  priradí číslo, ktoré do tejto množiny nepatrí.

Operácie  $+$  aj  $\cdot$  sú binárne operácie na množine  $\mathbb{R}^+$ . Na množine  $\mathbb{R}^-$  predstavuje  $+$  binárnu operáciu,  $\cdot$  však už nie je binárna operácia na tejto množine.

**Príklad 3.1.3.** Ako ďalší príklad definujme operáciu  $\oplus$  na množine  $\mathbb{Z}_5 = \{0, 1, 2, 3, 4\}$  takto:  $a \oplus b$  takto:  $a \oplus b = (a + b) \bmod 5$ . Operácia mod tu predstavuje zvyšok (v tomto prípade po delení piatimi). Napríklad  $1 \oplus 2 = 3$ ,  $2 \oplus 3 = 0$ ,  $3 \oplus 3 = 1$  (čísla najprv sčítame a potom urobíme zvyšok po delení 5).

Podobne môžeme definovať binárnu operáciu  $\odot$  ako  $a \odot b = (a \cdot b) \bmod 5$ .

Binárnu operáciu na konečnej množine môžeme tiež určiť tabuľkou: (do riadku  $a$  a stĺpca  $b$  píšeme výsledok operácie  $a \oplus b$ .)

$\oplus$	0	1	2	3	4
0	0	1	2	3	4
1	1	2	3	4	0
2	2	3	4	0	1
3	3	4	0	1	2
4	4	0	1	2	3

$\odot$	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4
2	0	2	4	1	3
3	0	3	1	4	2
4	0	4	3	2	1

Podobná operácia by sa dala definovať aj pre ľubovoľné prirodzené číslo  $n \geq 2$ . S množinami  $\mathbb{Z}_n = \{0, 1, \dots, n-1\}$  a binárnymi operáciami  $\oplus$  a  $\odot$  (čiže sčítovanie a násobenie modulo  $n$ ) sa v priebehu tejto prednášky stretnete ešte dosť často.

**Príklad 3.1.4.** Binárna operácia nemusí byť vždy daná predpisom – ak ide o konečnú množinu môže byť zadaná tabuľkou. (Dalo by sa povedať, že tabuľka binárnej operácie vlastne do istej miery zodpovedá zobrazeniu definovanému rôznymi predpismi pre rôzne prípady. Tu však sú jednotlivé časti definičného oboru len jednoprvkové.)

Napríklad môžeme definovať takúto binárnu operáciu  $\triangle$  na množine  $\{0, 1, 2\}$ :

$\triangle$	0	1	2
0	0	1	2
1	0	1	2
2	0	2	1

**Príklad 3.1.5.** Ako posledný príklad binárnej operácie, ktorej vlastnosti budeme vyšetřovať, definujme binárnu operáciu

$$a \triangleleft b = a$$

na množine  $\mathbb{N}$ .

Teraz sa budeme zaoberať niektorými základnými vlastnosťami binárnych operácií. Aby sme si ich lepšie ozrejmili, pre každú z nich overíme, či túto vlastnosť majú binárne operácie  $+$  a  $\cdot$  na množine  $\mathbb{R}$ ,  $\oplus$  na množine  $\mathbb{Z}_5$ , operácia  $\triangle$  z príkladu 3.1.4 a operácia  $\triangleleft$  z príkladu 3.1.5.

Vlastnosti, ktoré budeme definovať budú komutatívnosť, asociatívnosť, existencia (ľavého a pravého) neutrálneho prvku a existencia inverzného prvku. Pri overovaní, či uvedené binárne operácie majú túto vlastnosť, postupne vyplníme nasledujúcu tabuľku

	LN	PN	K	A	IP
$(\mathbb{R}, +)$					
$(\mathbb{R}, \cdot)$					
$(\mathbb{Z}_5, \oplus)$					
$(\mathbb{Z}_3, \triangle)$					
$(\mathbb{N}, \triangleleft)$					

**Definícia 3.1.6.** Nech  $*$  je binárna operácia na množine  $M$ . Hovoríme, že  $e \in M$  je *ľavý neutrálny prvok* operácie  $*$ , ak pre všetky  $m \in M$  platí

$$e * m = m.$$

Podobne,  $e$  je *pravý neutrálny prvok*, ak

$$m * e = m$$

pre každé  $m \in M$ .

Ak  $e$  je súčasne ľavý aj pravý neutrálny prvok operácie  $*$ , hovoríme, že  $e$  je *neutrálny prvok*.

Zo strednej školy vieme, že  $0 + m = m + 0 = m$ ,  $1 \cdot m = m \cdot 1 = m$ . To znamená, že 0 je neutrálny prvok pre operáciu  $+$  a 1 je neutrálny prvok pre operáciu  $\cdot$  na množine  $\mathbb{R}$ . Pretože rovnosť  $0 + m = m + 0 = m$  zostane v platnosti aj keď zo všetkých prvkov urobíme zvyšok po delení 5, 0 je aj neutrálnym prvkom operácie  $\oplus$  na množine  $\mathbb{Z}_5$ .

Prv než sa pozrieme na operáciu  $\triangle$ , skúsme si ozrejmiť ako sa prejaví existencia neutrálného prvku na tabuľke binárnej operácie. Rovnosť  $e * m = m$  znamená, že v riadku  $e$  sa vyskytnú rovnaké prvky ako v hlavičke tabuľky. To isté, ale pre stĺpce, vyplýva z rovnosti  $m * e = m$ . Skutočne, môžeme si všimnúť v tabuľke operácie  $\oplus$  na  $\mathbb{Z}_5$ , že v riadku 0 a v stĺpci 0 sa opakujú prvky 0,1,2,3,4. Ak sa v prípade operácie  $\triangle$  pozrieme na riadky, vidíme, že 0 a 1 sú ľavé neutrálny prvky. Keď skontrolujeme stĺpce, zistíme, že táto operácia nemá pravý neutrálny prvok. Teda táto operácia nemá neutrálny prvok. Priamo z definície operácie  $\triangleleft$  vidno, že v tomto prípade je každý prvok pravým neutrálnym prvkom, ale ľavý neutrálny prvok nemáme ani jeden.

	LN	PN	K	A	IP
$(\mathbb{R}, +)$	0	0			
$(\mathbb{R}, \cdot)$	1	1			
$(\mathbb{Z}_5, \oplus)$	0	0			
$(\mathbb{Z}_3, \triangle)$	0,1	x			
$(\mathbb{N}, \triangleleft)$	x	✓			

Teraz si dokážeme, že binárna operácia nemôže mať viac ako jeden neutrálny prvok. Spôsob dôkazu je typický pre prípad, keď chceme dokázať, že nejaký objekt je danou vlastnosťou jednoznačne určený. Pri dôkaze tvrdení takéhoto typu sa veľmi často postupuje tak, že uvažujeme dva objekty, ktoré majú túto vlastnosť a snažíme sa dokázať, že sa rovnajú.

**Tvrdenie 3.1.7.** Nech  $*$  je binárna operácia na množine  $M$ . Ak  $e_1$  je jej ľavý neutrálny a  $e_2$  je jej pravý neutrálny prvok, tak  $e_1 = e_2$ .

Špeciálne, ak má binárna operácia  $*$  na množine  $M$  neutrálny prvok, tak tento neutrálny prvok je jediný.

*Dôkaz.* Ak  $e_1, e_2$  sú ľavý a pravý neutrálny prvok operácie  $*$ , tak

$$e_1 \stackrel{(1)}{=} e_1 * e_2 \stackrel{(2)}{=} e_2,$$

pričom rovnosť (1) platí vďaka tomu, že  $e_2$  je pravý neutrálny prvok a rovnosť (2) platí vďaka tomu, že  $e_1$  je ľavý neutrálny prvok.  $\square$

Z toho špeciálne vyplýva, že ak máme viacero ľavých neutrálnych prvkov, žiadny prvok nie je pravým neutrálnym prvkom. Na príklade operácie  $\triangleleft$  sme videli, že jednostranných neutrálnych prvkov môže byť aj nekonečne veľa.

**Definícia 3.1.8.** Binárna operácia  $*$  na množine  $M$  je *komutatívna*, ak pre všetky  $x, y \in M$  platí

$$x * y = y * x.$$

Komutatívnosť vlastne znamená, že môžeme dvojice prvkov vymieňať. Väčšina operácií, s ktorými budeme pracovať, je komutatívna.

Opäť operácia  $+$  a  $\cdot$  na  $\mathbb{R}$  sú komutatívne. V prípade operácie  $\oplus$  si stačí uvedomiť, že rovnosť  $x + y = y + x$  sa zachová, aj keď urobíme zvyšok modulo 5, teda dostaneme

$$\begin{aligned} (x + y) \bmod 5 &= (y + x) \bmod 5, \\ x \oplus y &= y \oplus x. \end{aligned}$$

Operácia  $\triangle$  nie je komutatívna. Stačí si všimnúť, že

$$\begin{aligned} 0 \triangle 2 &\neq 2 \triangle 0, \\ 2 &\neq 0. \end{aligned}$$

Podobne sa dá overiť, že operácia  $\triangleleft$  na množine  $\mathbb{N}$  nie je komutatívna.

	LN	PN	K	A	IP
$(\mathbb{R}, +)$	0	0	✓		
$(\mathbb{R}, \cdot)$	1	1	✓		
$(\mathbb{Z}_5, \oplus)$	0	0	✓		
$(\mathbb{Z}_3, \triangle)$	0,1	x	x		
$(\mathbb{N}, \triangleleft)$	x	✓	x		

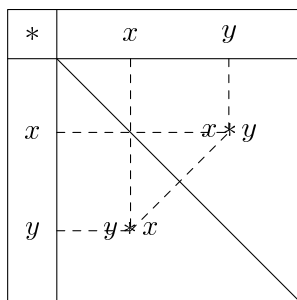
Opäť je užitočné si všimnúť, ako sa komutatívnosť prejaví na tabuľke binárnej operácie. Ak je binárna operácia komutatívna, musí byť tabuľka symetrická podľa hlavnej diagonály (pretože prvky  $x * y$  a  $y * x$  sú na diagonálne symetrických pozíciách).

**Definícia 3.1.9.** Binárna operácia  $*$  na množine  $M$  je *asociatívna*, ak pre všetky  $x, y, z \in M$  platí

$$(x * y) * z = x * (y * z).$$

Uzátvorkovanie v predchádzajúcej rovnosti znamená, ktorú operáciu robíme ako prvú. Formálne sa môžeme na asociatívny zákon pozeráť ako na „prehadzovanie zátvoriek“.

$$\begin{array}{c} (x * y) * z \\ \swarrow \quad \searrow \\ x * (y * z) \end{array}$$



Obr. 3.1: Komutatívnosť a tabuľka binárnej operácie

Niekedy, v zložitejších výrazoch, aby sme znázornili, kde presne sme použili asociatívny zákon, podčiarkneme na ľavej strane rovnosti tie zátvorky, ktoré „prehadzujeme“.

$$\underline{(x * y)} * z = x * (y * z).$$

Vlastnosť asociatívnosti vlastne hovorí to, že nezáleží na uzátvorkovaní, inak povedané zápis  $x * y * z$  predstavuje ten istý prvok, bez ohľadu na to, aké uzátvorkovanie zvolíme. Preto zátvorky môžeme vynechávať.

Hoci vlastnosť asociatívnosti tak, ako sme ju definovali, hovorí len o tom, že zátvorky môžeme vynechať, ak ide o súčin 3 prvkov, nie je ťažké si uvedomiť, že to platí aj pre viac prvkov. K tomuto faktoru sa ešte vrátíme na konci tejto podkapitoly.

O operáciách  $+$  a  $\cdot$  vieme, že sú asociatívne. Pre operáciu  $\oplus$  môžeme použiť podobnú úvahu ako pri komutatívnosti. Keď si všimneme, že

$$2\Delta(0\Delta 2) = 2\Delta 2 = 1,$$

$$(2\Delta 0)\Delta 2 = 0\Delta 2 = 2,$$

vidíme, že operácia  $\Delta$  nie je asociatívna

Operácia  $\triangleleft$  je asociatívna, lebo pre ľubovoľné  $a, b, c, \in \mathbb{N}$  platí

$$a \triangleleft (b \triangleleft c) = a \triangleleft b = a$$

$$(a \triangleleft b) \triangleleft c = a \triangleleft c = a$$

Môžeme teda doplniť ďalší stĺpec našej tabuľky.

	LN	PN	K	A	IP
$(\mathbb{R}, +)$	0	0	✓	✓	
$(\mathbb{R}, \cdot)$	1	1	✓	✓	
$(\mathbb{Z}_5, \oplus)$	0	0	✓	✓	
$(\mathbb{Z}_3, \Delta)$	0,1	x	x	x	
$(\mathbb{N}, \triangleleft)$	x	✓	x	✓	

Teraz nasleduje definícia inverzného prvku. O inverznom prvku má zmysel hovoriť iba vtedy, ak má binárna operácia neutrálny prvok. Opäť má zmysel hovoriť o ľavom a pravom inverznom prvku.

**Definícia 3.1.10.** Nech  $*$  je binárna operácia na množine  $M$ . Nech  $a \in M$  a nech  $e$  je neutrálny prvok operácie  $*$ . Prvok  $b \in M$  je *inverzný* k prvku  $a$ , ak platí

$$a * b = b * a = e.$$

V prípade, že platí  $a * b = e$ ,  $b$  nazývame *pravý inverzný prvok* k  $a$ . Ak  $b * a = e$ , tak  $b$  je *ľavý inverzný prvok* k  $a$ .

**Príklad 3.1.11.** Pre operáciu  $+$  platí

$$a + (-a) = 0 = (-a) + a,$$

teda ľubovoľný prvok  $a \in \mathbb{R}$  má inverzný prvok a je to prvok  $-a$ . (Ako sme spomenuli pred chvíľou, pretože táto operácia je komutatívna, stačí vlastne overovať len jednu z uvedených rovností.)

Podobne pre komutatívnu operáciu  $\cdot$  bude inverzným prvkom ku  $a \neq 0$  prvok  $\frac{1}{a}$ , lebo

$$a \cdot \frac{1}{a} = 1.$$

Číslo 0 nemá v tejto operácii inverzný prvok, lebo  $0 \cdot b = 0$  pre ľubovoľné  $b \in \mathbb{R}$ .

V prípade množiny  $\mathbb{Z}_5$  a operácie  $\oplus$  platí  $0 \oplus 0 = 1 \oplus 4 = 2 \oplus 3 = 0$ , teda ku každému prvku sme našli inverzný prvok. (Všimnime si, že inverzný prvok k  $a$  je práve zvyšok čísla  $-a$  po delení 5. Vedeli by ste tento fakt zdôvodniť?)

Pre operáciu  $\triangle$  nemá zmysel hovoriť o inverznom prvku, lebo táto operácia nemá ani neutrálny prvok. Teraz už teda môžeme konečne vyplniť celú našu tabuľku.

	LN	PN	K	A	IP
$(\mathbb{R}, +)$	0	0	✓	✓	✓
$(\mathbb{R}, \cdot)$	1	1	✓	✓	x
$(\mathbb{Z}_5, \oplus)$	0	0	✓	✓	✓
$(\mathbb{Z}_3, \triangle)$	0,1	x	x	x	x
$(\mathbb{N}, \triangleleft)$	x	✓	x	✓	x

**Tvrdenie 3.1.12.** *Nech  $*$  je asociatívna operácia na množine  $M$  a  $*$  má neutrálny prvok  $e$ . Ak existuje inverzný prvok k  $a$ , tak je jednoznačne určený.*

*Dôkaz.* Predpokladajme, že  $b_1$  a  $b_2$  sú inverzné prvky ku  $a$ . Postupnými úpravami nasledujúcej rovnosti (ktorá vyplýva z asociatívnosti) dostaneme

$$\begin{aligned} b_1 * (a * b_2) &= (b_1 * a) * b_2 \\ b_1 * e &= e * b_2 \\ b_1 &= b_2 \end{aligned}$$

□

Pretože pre asociatívnu operáciu je inverzný prvok jednoznačne určený prvkom  $a$ , môžeme preň zaviesť označenie. Budeme ho označovať  $a^{-1}$ .

V tabuľke binárnej operácie vieme inverzný prvok nájsť tak, že v riadku  $a$  vyhladáme stĺpec, kde sa vyskytuje neutrálny prvok. To isté urobíme v stĺpci  $a$  – nájdeme riadok, v ktorom je neutrálny prvok. Ak sa nájdenny riadok a stĺpec zhodujú, tak sme našli inverzný prvok k  $a$ .

### 3.1.1 Zovšeobecnený asociatívny zákon\*

Ako sme slúbili, vrátíme sa na chvíľu ešte k asociatívnemu zákonu. Pôjde nám o to, aby sme si uvedomili, že pre asociatívnu operáciu môžeme skutočne vynechávať zátvorky, aj keď vo výraze vystupuje viac prvkov ako 3.

Najprv si to ukážeme pre 4 prvky a potom podáme aj formálny dôkaz, že to platí pre ľubovoľný počet prvkov.

Na začiatok sa pokúste nájsť všetky možné uzátvorkovania výrazu  $a \circ b \circ c \circ d$ . V nasledujúcej úlohe si môžete overiť, či ste skutočne našli všetky.

Pokúste sa potom pomocou asociatívneho zákona odvodiť, že všetky tieto vyjadrenia sa rovnajú. (Možnosť ako to dokazovať je veľmi veľa, jednu nájdete v nasledujúcej úlohe.)

**Príklad 3.1.13.** Dokážte, že ak  $\circ$  je binárna operácia na množine  $A$  a  $\circ$  je asociatívna, tak ľubovoľné uzátvorkovanie výrazu  $a \circ b \circ c \circ d$  predstavuje ten istý prvok.

Všetky možné uzátvorkovania sú<sup>1</sup>

$$(1) a \circ ((b \circ c) \circ d)$$

$$(2) a \circ (b \circ (c \circ d))$$

$$(3) (a \circ b) \circ (c \circ d)$$

$$(4) ((a \circ b) \circ c) \circ d$$

$$(5) (a \circ (b \circ c)) \circ d$$

Sú to skutočne všetky možné uzátvorkovania – najprv sme uviedli tie, kde sa ako posledná operácia vykoná vynásobenie prvkom  $a$  zľava, výraz (3) predstavuje jediné uzátvorkovanie, kde sú prvky rozdelené na dve dvojice a výrazy (4) a (5) sú tie uzátvorkovania, kde sa ako posledné vykoná vynásobenie prvkom  $d$ .

Podľa asociatívneho zákona platí

$$(b \circ c) \circ d = b \circ (c \circ d).$$

Ak vynásobíme túto rovnosť zľava prvkom  $a$ , dostaneme

$$a \circ ((b \circ c) \circ d) = a \circ (b \circ (c \circ d)),$$

čo je vlastne rovnosť (1) = (2).

Podobne, ak použijeme asociatívnosť pre prvky  $a, b, c$  a vzniknutú rovnosť vynásobíme sprava prvkom  $d$ , dostaneme (4) = (5).

Dvojnásobným použitím asociatívneho zákona (podčiarknutím sú zvýraznené zátvorky, ktoré sme v príslušnej rovnosti „prehodili“) dostaneme

$$a \circ \underline{(b \circ (c \circ d))} = (a \circ b) \circ \underline{(c \circ d)} = ((a \circ b) \circ c) \circ d,$$

čo je vlastne rovnosť (2) = (3) = (4).

Spojením všetkých týchto rovností dostaneme, že všetky uvedené výrazy sa rovnajú.

Predchádzajúci príklad by vás snáď mohol presvedčiť o tom, že niečo podobné platí aj pre uzátvorkovanie ľubovoľného počtu prvkov. Ale vôbec nie je jasné, ako by sa takéto niečo dalo dokázať. To si ukážeme v nasledujúcom (nepovinnom) dôkaze.

**Tvrdenie 3.1.14** (Zovšeobecnený asociatívny zákon). *Nech  $\cdot$  je asociatívna binárna operácia na množine  $A$ . Potom súčin  $a_1 * a_2 * \dots * a_n$  nezávisí od spôsobu uzátvorkovania.*

*Dôkaz.* Tvrdenie budeme dokazovať úplnou indukciou vzhľadom na  $n$ . Pri dôkaze budeme postupovať tak, že si vyberieme jedno uzátvorkovanie, konkrétne  $a_1 * (a_2 * (a_3 * \dots (a_{n-1} * a_n)))$ , a budeme sa snažiť dokázať, že všetky ostatné možné uzátvorkovania predstavujú ten istý prvok.

<sup>1</sup>V prípade, že vám vyšiel iný počet alebo iné uzátvorkovania, skúste si ozrejmiť čo presne rozumieme pod uzátvorkovaním – je to taký zápis, ktorý jednoznačne určuje poradie vykonaných operácií. Pritom poradie prvkov  $a, b, c, d$  nesmieme prehadzovať.

1° Pre  $n = 2$  máme jediné možné uzátvorkovanie, preto tvrdenie platí.

2° Predpokladajme teraz, že tvrdenie platí pre ľubovoľný počet prvkov menší ako  $n$ .

Ak máme nejakú uzátvorkovanú výraz  $a_1 * a_2 * \dots * a_n$ , sú dve možnosti ako môže vyzeráť.

Buď má tvar

$$a_1 * \underbrace{(a_2 * a_3 * \dots * a_n)}_{\text{nejako uzátvorkované}}$$

alebo

$$(a_1 * \dots * a_k) * (a_{k+1} * \dots * a_n),$$

kde opäť prvá a druhá zátvorka môžu byť uzátvorkované ľubovoľným spôsobom.

V prvom prípade, podľa indukčného predpokladu

$$a_2 * a_3 * \dots * a_n = a_2 * (a_3 * \dots * (a_{n-1} * a_n)).$$

(Inými slovami, ľubovoľné uzátvorkovanie  $n-1$  prvkov  $a_2, a_3, \dots, a_n$  sa rovná prvku určenému nami zvoleným usporiadaním.) Vynásobením tejto rovnosti zľava prvkom  $a_1$  dostaneme

$$a_1 * (a_2 * a_3 * \dots * a_n) = a_1 * (a_2 * (a_3 * \dots * (a_{n-1} * a_n))).$$

Zostáva nám ešte druhý prípad. V tomto prípade najprv použijeme indukčný predpoklad pre obe zátvorky

$$(a_1 * \dots * a_k) * (a_{k+1} * \dots * a_n) = (a_1 * (a_2 * \dots * a_k)) * (a_{k+1} * (a_{k+2} * \dots * a_n)).$$

Využitím asociatívosti dostaneme

$$\underline{(a_1 * (a_2 * \dots * a_k))} * (a_{k+1} * (a_{k+2} * \dots * a_n)) = a_1 * ((a_2 * \dots * a_k) * (a_{k+1} * (a_{k+2} * \dots * a_n))),$$

čím sme upravili daný výraz na tvar súčinu prvku  $a_1$  a nejakú uzátvorkovaných ostatných prvkov (čo je presne prvý prípad, ktorý sme už vyriešili).

Teraz teda opäť stačí použiť indukčný predpoklad na prvky v zátvorke a dostaneme požadovaný tvar

$$a_1 * ((a_2 * \dots * a_k) * (a_{k+1} * (a_{k+2} * \dots * a_n))) = a_1 * (a_2 * (a_3 * \dots * (a_{n-1} * a_n))).$$

□

**Poznámka\* 3.1.15.** Ako zaujímavosť môžeme spomenúť, že počet uzátvorkovaní  $n + 1$  symbolov určuje  $n$ -té *Catalanove číslo*

$$C_n = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}.$$

Dôkaz tohoto faktu nie je jednoduchý. Pri niektorých odvodeniach uvedenej formuly sa používa rovnosť

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

môžete sa skúsiť zamyslieť nad tým, či by ste ju vedeli odvodiť. Súvisí táto rovnosť s nejakým spôsobom (algoritmom) na vymenovanie všetkých možných uzátvorkovaní?

### Cvičenia

**Úloha 3.1.1.** Vypíšte všetky možné binárne operácie na množine  $\{0, 1\}$ . Ktoré z nich sú asociatívne, komutatívne, majú neutrálny prvok? Pre ktoré existuje ku každému prvku aj inverzný?

**Úloha 3.1.2.** Na  $\mathbb{Z}_7 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  definujme operácie  $\oplus$  a  $\odot$  podobne ako pre  $\mathbb{Z}_5$  v príklade 3.1.3. (Teda ako obvyklé sčítovanie a násobenie, ibaže po urobení tejto operácie urobíme zvyšok po delení 7, čím dostaneme prvok zo  $\mathbb{Z}_7$ .) Zistite, či sú tieto operácie asociatívne, komutatívne, či existuje neutrálny prvok a či má každý prvok inverzný. Vedeli by ste to v prípade operácie  $\oplus$  nájsť inverzný prvok aj bez toho, že by ste skúšali jednotlivé prvky?

**Úloha 3.1.3.** Nájdite binárnu operáciu,

- pre ktorú aspoň jeden prvok má viacero ľavých inverzných prvkov,
- ktorá je asociatívna a aspoň jeden prvok má viacero ľavých inverzných prvkov.

**Úloha 3.1.4.** Na  $\mathbb{R}$  definujme operáciu  $x * y = x + y + x^2y$ . Overte, že každé  $x \in \mathbb{R}$  má vzhľadom na túto binárnu operáciu jediný pravý, ale existujú reálne čísla, ktoré nemajú ľavý inverzný prvok.

**Úloha 3.1.5\*.** Ak viete, že ide o tabuľku asociatívnej binárnej operácie, doplňte chýbajúce výsledky (ak sa to dá).

	a	b	c
a	b	a	c
b			
c			

## 3.2 Grupy

V tejto časti sa konečne dostávame k definícii grupy. Pre nás síce grupy poslúžia len ako pomocný aparát – na to, aby sme mohli jednoduchšie zdefinovať pojem poľa a dokázať niektoré vlastnosti polí – od svojho vzniku sa teória grúp stala samostatnou, veľmi rozsiahlou matematickou disciplínou, zasahujúcou do najrozličnejších oblastí matematiky. Viac sa o grupách dozviete neskôr. Podobne aj o poliach sa v priebehu vášho štúdia dozviete aj ďalšie zaujímavé fakty, na tejto prednáške uvedieme len tie, ktoré budeme potrebovať pri práci s vektorovými priestormi.

**Definícia 3.2.1.** Dvojica  $(G, *)$ , kde  $G$  je množina a  $*$  je binárna operácia na  $G$ , sa nazýva *grupa*, ak

- operácia  $*$  je asociatívna,
- operácia  $*$  má neutrálny prvok, (neutrálny prvok budeme spravidla označovať  $e$ )
- ku každému prvku  $g \in G$  existuje inverzný prvok vzhľadom na operáciu  $*$ . (Tento inverzný prvok budeme označovať  $g^{-1}$ .)

**Poznámka 3.2.2.** Pretože požadujeme existenciu neutrálného prvku  $e \in G$ , z definície grupy automaticky vyplýva, že množina  $G$  je neprázdna,  $G \neq \emptyset$ .

**Príklad 3.2.3.** Na základe tabuľky, ktorú sme vyplnili v príklade 3.1.11 vidíme, že  $(\mathbb{R}, +)$  aj  $(\mathbb{Z}_5, \oplus)$  sú grupy.



Naopak,  $(\mathbb{R}, \cdot)$  nie je grupa, pretože 0 nemá inverzný prvok. V tomto prípade môžeme situáciu zachrániť, ak zmeníme množinu, na ktorej budeme túto binárnu operáciu uvažovať. Tvrdíme, že  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$  je grupa.

O tom, že  $\cdot$  je binárna operácia aj na množine  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$  sme už hovorili v príklade 3.1.2. Neutrálny prvok je 1, toto číslo patrí do množiny  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ . Takisto asociatívnosť sa neporuší pri prechode ku menšej množine. Pretože sme vynechali nulu, každý prvok  $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ , už teraz má inverzný prvok  $\frac{1}{a}$ , ktorý tiež patrí do množiny  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ .

**Definícia 3.2.4.** Grupa  $(G, *)$  sa nazýva *komutatívna*, ak operácia  $*$  na  $G$  je komutatívna. (Tiež sa používa termín *abelovská grupa*.)

Nie každá grupa je komutatívna. Príkladom nekomutatívnej grupy je grupa  $S_n$  všetkých permutácií  $n$ -prvkovej množiny pre  $n \geq 3$  (úloha 3.2.2).

**Veta 3.2.5** (Zákony o krátení). *Ak  $(G, *)$  je grupa, tak pre ľubovoľné  $a, b, c \in G$  platí*

$$\begin{aligned} a * b = a * c &\Rightarrow b = c \\ b * a = c * a &\Rightarrow b = c \end{aligned}$$

Inak povedané, zákony o krátení hovoria, že v grupe môžeme krátiť ľubovoľným prvkom zľava aj sprava.

*Dôkaz.* Z rovnosti  $a * b = a * c$  dostaneme vynásobením prvkom  $a^{-1}$  zľava

$$\begin{aligned} a^{-1} * (a * b) &= a^{-1} * (a * c) \\ (a^{-1} * a) * b &= (a^{-1} * a) * c \\ e * b &= e * c \\ b &= c \end{aligned}$$

(V jednotlivých krokoch sme využili asociatívnosť, definíciu inverzného a neutrálneho prvku.)

Implikácia  $b * a = c * a \Rightarrow b = c$  sa dokáže analogicky, ibaže prvkom  $a^{-1}$  budeme násobiť sprava.  $\square$

Zákony o krátení môžeme zapísať aj v ekvivalentnej podobe (obmenená implikácia, pozri príklad 2.1.11):

$$\begin{aligned} b \neq c &\Rightarrow a * b \neq a * c \\ b \neq c &\Rightarrow b * a \neq c * a \end{aligned}$$

Skúsme si premyslieť, ako sa prejavajú zákony o krátení v tabuľke binárnej operácie. Prvky tvaru  $a * b$ , kde  $b \in G$ , sú práve prvky v riadku  $a$ . Zákon o krátení v tvare  $b \neq c \Rightarrow a * b \neq a * c$  teda znamená, že v rôznych stĺpcoch riadku  $a$  sa objavia rôzne výsledky operácie  $*$ . Inak povedané, v žiadnom riadku sa nesmie viackrát vyskytnúť ten istý prvok. Podobne, zákon o krátení zľava hovorí, že v žiadnom stĺpci sa nezopakuje nijaký prvok viackrát.

**Veta 3.2.6.** *Nech  $(G, *)$  je grupa. Potom pre ľubovoľné  $a, b \in G$  platí*

$$\begin{aligned} (a^{-1})^{-1} &= a \\ (a * b)^{-1} &= b^{-1} * a^{-1} \end{aligned}$$

*Dôkaz.* Najprv použijeme dvakrát definíciu inverzného prvku. Inverzný prvok  $a^{-1}$  musí spĺňať rovnosť

$$(a^{-1})^{-1} * a^{-1} = e.$$

Definícia inverzného prvku pre  $a$  nám dáva

$$a * a^{-1} = e.$$

Porovnaním týchto 2 rovností dostaneme

$$(a^{-1})^{-1} * a^{-1} = a * a^{-1}$$

a zo zákona o krátení vyplýva

$$(a^{-1})^{-1} = a.$$

Aj na dôkaz druhej rovnosti chceme využiť zákony o krátení. Z definície inverzného prvku máme

$$(a * b)^{-1} * (a * b) = e.$$

Aby sme mohli využiť zákon o krátení bolo by dobre, keby sme nejako upravili výraz  $(b^{-1} * a^{-1}) * (a * b)$ , tak sa pokúsme upraviť ho (budeme používať asociatívny zákon a definíciu inverzného a neutrálneho prvku).

$$\underline{(b^{-1} * a^{-1})} * (a * b) = b^{-1} * (a^{-1} * \underline{(a * b)}) = b^{-1} * ((a^{-1} * a) * b) = b^{-1} * (e * b) = b^{-1} * b = e$$

Zistili sme teda, že  $(a * b)^{-1} * (a * b) = (b^{-1} * a^{-1}) * (a * b)$  a zo zákona o krátení potom vyplýva

$$(a * b)^{-1} = b^{-1} * a^{-1}.$$

□

V predchádzajúcom dôkaze sme podrobne rozpisovali každé použitie asociatívneho zákona. Pretože sme už v používaní asociatívneho zákona ostrielaní, môžeme si prácu zjednodušiť vynechávaním zátvoriek (ktoré si vieme na patričných miestach domyslieť) a uvedenú úpravu zapísať stručnejšie ako

$$b^{-1} * a^{-1} * a * b = b^{-1} * e * b = b^{-1} * b = e.$$

**Poznámka 3.2.7.** Grupy, s ktorými ste sa doteraz najčastejšie stretli, sú asi  $(\mathbb{R}, +)$  a  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ . Aj pre grupy vo všeobecnosti sa veľmi často zvykne grupová operácia často označovať  $+$  alebo  $\cdot$ . Vtedy hovoríme o *aditívnom* (pomocou znamienka  $+$ ) alebo *multiplikatívnom* (pomocou  $\cdot$ ) zápise grupovej operácie.

Pri aditívnom zápise sa zvykne inverzný prvok zapisovať ako  $-a$ , pri multiplikatívnom ako  $a^{-1}$  alebo aj  $\frac{1}{a}$ . Takisto neutrálny prvok sa v závislosti od použitej symboliky niekedy označuje ako 0 alebo 1.

Rozdiel medzi týmito dvoma druhmi zápisu sa napríklad prejaví aj vtedy, ak chceme zapísať  $n$ -násobné použitie operácie na prvok  $a$  (pozri úlohu 3.2.16). Pri aditívnom zápise sa spravidla používa symbol  $n \times a$ , pri multiplikatívnom  $a^n$ .

My budeme používať označenia tak, ako sme ich zaviedli v tejto kapitole. Teda keď budeme pracovať s grupou vo všeobecnosti, budeme neutrálny prvok označovať  $e$  a inverzný prvok  $a^{-1}$ . V prípade konkrétnych grúp a hlavne v prípade polí a vektorových priestorov, kde sa priamo v definícii vyskytne binárna operácia označovaná ako  $+$  však uprednostníme aditívny zápis. (V oboch spomínaných definíciách na to výslovne upozorníme). Takisto budeme používať aditívny zápis pre grupu  $(\mathbb{Z}_n, \oplus)$  a mnohé ďalšie grupy, kde je prirodzené označiť grupovú operáciu znakom  $+$ . (Napríklad v úlohe 3.2.8, kde sa zaoberáme sčítaním funkcií, je prirodzené označovať neutrálny prvok znakom 0.)

## Cvičenia

**Úloha 3.2.1.** Ktoré z uvedených množín tvoria vzhľadom na dané operácie grupu? V ktorých prípadoch je táto grupa komutatívna?

- $(\mathbb{Z}, \cdot)$  (celé čísla s obvyklým násobením)
- $(\mathbb{R}, \cdot)$  (reálne čísla s obvyklým násobením)
- $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ , d)  $(\mathbb{C}, +)$ , e)  $(\mathbb{C}, \cdot)$ , f)  $(\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$
- $(\mathbb{R}^2, +)$  (so sčítaním definovaným po zložkách)
- $\mathbb{R}$  s operáciou  $*$ ,  $a * b = a + b - 1$
- $\mathbb{R} \setminus \{-1\}$  s operáciou  $*$ ,  $a * b = ab + a + b$
- Množina všetkých párnych celých čísel vzhľadom na sčítanie.
- Množina všetkých nepárnych celých čísel vzhľadom na sčítanie.
- $(\mathbb{Z}_5, \oplus)$

**Úloha 3.2.2.** Tvoria všetky permutácie na konečnej množine  $M$  s operáciou skladania zobrazení grupu? Je táto grupa komutatívna? Urobte tabuľku grupovej operácie v prípade  $M = \{1, 2, 3\}$ .

**Úloha 3.2.3.** Je  $(\mathbb{R}, *)$ , kde  $a * b = ab + a + b$ , grupa? Ak nie, vedeli by ste vynechať niektorý prvok  $a$  z množiny  $\mathbb{R}$  tak, aby  $(\mathbb{R} \setminus \{a\}, *)$  bola grupa?

**Úloha 3.2.4.** Nech  $G$  je množina všetkých funkcií  $f_{a,b}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , ktoré sú tvaru  $f_{a,b}(x) = ax + b$  pre nejaké reálne čísla  $a, b \in \mathbb{R}$ . Tvorí táto množina funkcií s operáciou skladania zobrazení grupu? Je množina  $\{f_{a,b}; a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0\}$  s operáciou skladania zobrazení grupu? Dostaneme grupu, ak vezmeme len také  $a, b \in \mathbb{R}$ , že  $a = 1$ ? V tých prípadoch, keď dostaneme grupu, je táto grupa komutatívna?

**Úloha 3.2.5.** Nech  $G = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$ . Je  $G$  s operáciou  $\cdot$  (násobenie komplexných čísel) grupa? Označme  $C_n = \{z \in \mathbb{C} : z^n = 1\}$ . Je  $(C_n, \cdot)$  grupa?

**Úloha 3.2.6\*.** Budeme uvažovať o nasledujúcich operáciách s množinami:

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

$A \cap B = \{x; x \in A \wedge x \in B\}$  (prienik)

$A \setminus B = \{x; x \in A \wedge x \notin B\}$  (rozdiel)

$A \div B = \{x; x \in A \Leftrightarrow x \in B\}$  (symetrická diferenciacia - ekvivalentne ju môžeme definovať ako

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

Ak  $X$  je ľubovoľná množina,  $P(X)$  označíme množinu všetkých jej podmnožín. Potom  $\cup, \cap, \setminus, \div$  sú binárne operácie na  $P(X)$ . Je  $P(X)$  s niektorou z týchto operácií grupa?

**Úloha 3.2.7.** Označme:

$M_1 = \{f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}; f \text{ je bijekcia}\}$

$M_2 = \{f \in M_1; f(n) = n \text{ pre všetky celé čísla } n \text{ až na konečný počet}\}$

$M_3 = \{f \in M_1; f(n) = n \text{ len pre konečný počet } n\}$ .

Ktoré z množín  $M_1, M_2, M_3$  tvoria grupu spolu s operáciou skladania zobrazení?

**Úloha 3.2.8.** Nech  $G$  je množina všetkých zobrazení  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Na tejto množine definujeme operáciu  $\oplus$  tak, že  $(f \oplus g)(x) = f(x) + g(x)$ . Je  $G$  s touto operáciou grupa? Ak definujeme  $(f \odot g)(x) = f(x) \cdot g(x)$ , bude  $(G, \odot)$  grupa? Ktoré funkcie treba vynechať, aby sme dostali grupu?

**Úloha 3.2.9.** Nech  $M \neq \emptyset$  je množina a  $(G, \circ)$  je grupa. Nech  $H$  je množina všetkých zobrazení  $f: M \rightarrow G$ . Definujme na  $H$  binárnu operáciu  $*$  tak, že  $(f * g)(x) = f(x) \circ g(x)$ . Je  $(H, *)$  grupa?

**Úloha 3.2.10.** Na množine  $\mathbb{R}^n$  (teda na množine všetkých usporiadaných  $n$ -tíc reálnych čísel) definujeme binárnu operáciu  $+$  ako  $(x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n)$ . Je  $\mathbb{R}^n$  s touto operáciou grupa? (Použili sme symbol  $+$  v dvoch rôznych významoch – raz ako operáciu na  $\mathbb{R}^n$ , ktorú definujeme, a raz ako dobre známe sčítanie na množine  $\mathbb{R}$ . Keby sme chceli byť dôslední, zaviedli by sme nový symbol pre operáciu na  $\mathbb{R}^n$ , napríklad  $(x_1, \dots, x_n) \oplus (y_1, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n)$ . K tomuto problému – používanie rovnakého symbolu v rôznych významoch – sa ešte vrátíme.)

**Úloha 3.2.11.** Ak  $(G, \circ)$  je grupa a  $a \in G$  je nejaký jej prvok, tak zobrazenie  $f_a: G \rightarrow G$  definované ako  $f_a(x) = a \circ x$  je bijekcia.

**Úloha 3.2.12.** Nech  $(G, \circ)$  je grupa. Dokážte, že zobrazenie  $f: G \rightarrow G$  definované ako  $f(x) = x^{-1}$  je bijekcia.

**Úloha 3.2.13\*.** Nech  $G$  je neprázdna množina a  $\circ$  je asociatívna binárna operácia na  $G$ . Potom  $G$  je grupa práve vtedy, keď pre ľubovoľné  $a, b \in G$  majú rovnice

$$a \circ x = b$$

$$y \circ a = b$$

riešenie v  $G$  (inými slovami, pre ľubovoľné  $a, b \in G$  existujú  $x, y \in G$ , ktoré spĺňajú tieto dve rovnosti.)

**Úloha 3.2.14\*.** Nech  $G$  je konečná množina a  $\circ$  je binárna operácia na  $G$  taká, že platí asociatívny zákon a zákon o krátení. Dokážte, že  $G$  je grupa.

**Úloha 3.2.15\*.** Dokážte, že v konečnej grupe, ktorá má párny počet prvkov, existuje prvok rôzny od neutrálneho prvku taký, že  $a \circ a = e$ .

**Úloha 3.2.16.** Nech  $(G, *)$  je grupa a  $a \in G$ . Potom pre ľubovoľné  $n \in \mathbb{N}$  definujeme matematickou indukciou prvok  $a^n$  nasledovne:

$$a^0 = e$$

$$a^{n+1} = a^n * a.$$

(Je to presne to, čo by sme intuitívne chápali pod zápisom  $\underbrace{a * a * \dots * a}_{n\text{-krát}}$ .)

Túto definíciu môžeme rozšíriť aj na záporné čísla tak, že pre  $n \in \mathbb{N}$  položíme  $a^{-n} = (a^{-1})^n$ . Tým je  $a^n$  definované pre ľubovoľné  $a \in G$  a  $n \in \mathbb{Z}$ . (Všimnite si, že to korešponduje s označením  $a^{-1}$ , ktoré používame pre inverzný prvok.)

Dokážte, že pre ľubovoľné  $a, b \in G$  a  $m, n \in \mathbb{Z}$  platí:

a)  $a^{m+n} = a^m * a^n$ ,

b)  $(a^m)^n = a^{mn}$ ,

c) ak  $a * b = b * a$ , tak  $a^n * b^n = (a * b)^n$ ,

**Úloha 3.2.17.** Nech konečná množina  $G = \{e, a_1, \dots, a_n\}$  tvorí s operáciou  $*$  komutatívnu grupu a  $e$  je jej neutrálny prvok. Dokážte, že  $(a_1 * a_2 * \dots * a_n)^2 = e$ .

**Úloha 3.2.18.** Nech  $*$  je binárna operácia na množine  $A$ , taká, že pre každé  $a, b, c \in A$  platí  $a * (b * c) = (a * c) * b$  a  $*$  má neutrálny prvok. Dokážte, že operácia  $*$  je komutatívna a asociatívna.

**Úloha 3.2.19.** Nech  $(G, \circ)$  je grupa. Dokážte, že ak  $x \circ x = x$ , tak  $x = e$ .

**Úloha 3.2.20.** Zistite, či  $(\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}, \square)$ , kde pre každé  $(a, b), (c, d) \in \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}$  definujeme  $(a, b) \square (c, d) = (2ac, b + d)$ , je grupa.

**Úloha 3.2.21.** Nech  $G = \mathbb{R} \times (\mathbb{R} \setminus \{0\})$ . Definujme na tejto množine binárnu operáciu  $*$  predpisom  $(a, b) * (c, d) = (a + bc, bd)$ . Je to skutočne binárna operácia? Je  $(G, *)$  grupa? Je to komutatívna grupa?

**Úloha 3.2.22.** Doplňte nasledujúcu tabuľku tak aby ste dostali grupu.

	a	b	c	d
a				
b				d
c			d	
d				

**Úloha 3.2.23.** Ak pre každý prvok  $x$  grupy  $(G, \circ)$  platí  $x \circ x = e$ , tak táto grupa je komutatívna.

**Úloha 3.2.24.** Je množina  $\mathbb{Q}$  s operáciou  $\triangleleft$  definovanou ako  $a \triangleleft b = ab - a$  grupa? Je táto operácia komutatívna? Má ľavý neutrálny prvok? Má pravý neutrálny prvok?

**Úloha 3.2.25.** Nech  $*$  je asociatívna binárna operácia na množine  $M$ , ktorá má neutrálny prvok  $e$ . Ak pre nejaké  $x \in M$  platí  $x * x = x$  a ku  $x$  existuje ľavý inverzný prvok, tak  $x = e$ .

**Úloha 3.2.26\*.** Nech  $*$  je binárna operácia na množine  $G$ , ktorá

- je asociatívna,
- má ľavý neutrálny prvok t.j. existuje prvok  $e \in G$  taký, že  $(\forall x \in G)e * x = x$
- pre každý prvok  $x \in G$  existuje  $y \in G$  také, že  $y * x = e$  (kde  $e$  označuje prvok z časti b) t.j.

$$(\forall x \in G)(\exists y \in G)y * x = e$$

(stručne môžeme povedať, že ku každému prvku existuje ľavý inverzný prvok vzhľadom na  $e$ ).

Dokážte, že potom  $(G, *)$  je grupa.

**Úloha 3.2.27.** Nech  $G$  je konečná grupa,  $|G| = n$ . Neutrálny prvok tejto grupy označme  $e$  a jej prvky označme ako  $a_1, \dots, a_n$  (t.j.  $G = \{a_1, \dots, a_n\}$ ).

a) Ukážte, že pre ľubovoľné  $a \in G$  platí  $G = \{aa_1, \dots, aa_n\}$ .

b) Ukážte, že pre ľubovoľné  $a \in G$  platí  $a^n = e$ .

(Poznámka: Takéto tvrdenie platí aj pre nekomutatívnej grupy – v tom prípade ale treba použiť iný argument. Dá sa to odvodiť napríklad ako dôsledok Lagrangeovej vety.)

### 3.3 Polia

V tejto podkapitole zdefinujeme polia. Základnými príkladmi polí sú reálne čísla, racionálne čísla a komplexné čísla. Väčšina vlastností, o ktorých budeme hovoriť, vám preto bude dobre známa.

Výhoda toho, že sa budeme mnohé užitočné vlastnosti týchto známych číselných oborov dokázať pomocou niekoľkých jednoduchých základných axiém spočíva v tom, že aj pre iné číselné množiny, ktoré spĺňajú axiomy z definície poľa, budeme môcť automaticky použiť všetky výsledky, ktoré si dokážeme o poliach vo všeobecnosti.

**Definícia 3.3.1.** Nech  $F$  je množina,  $+$  a  $\cdot$  sú binárne operácie na  $F$ . Hovoríme, že trojica  $(F, +, \cdot)$  je *pole*, ak

- $(F, +)$  je komutatívna grupa, jej neutrálny prvok budeme označovať 0;
- $(F \setminus \{0\}, \cdot)$  je komutatívna grupa, jej neutrálny prvok budeme označovať 1;

(iii) pre ľubovoľné  $a, b, c \in F$  platí

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

(Túto vlastnosť nazývame *distributívnosť*.)

Pre inverzný prvok v grupe  $(F, +)$  budeme používať označenie  $-a$ , t.j. pre túto grupu používame aditívny zápis. Prvok  $-a$  nazývame *opačný prvok* k prvku  $a$ .

Pre grupu  $(F \setminus \{0\}, \cdot)$  budeme používať multiplikatívny zápis, teda inverzný prvok k prvku  $a \neq 0$  poľa  $F$  vzhľadom na operáciu  $\cdot$  budeme značiť  $a^{-1}$ . Ak použijeme termín *inverzný prvok* v súvislosti s polom a nešpecifikujeme binárnu operáciu, myslí sa tým práve prvok  $a^{-1}$ .

Namiesto  $b + (-c)$  budeme používať stručnejší zápis  $b - c$ .

O operáciach  $+$  a  $\cdot$  v poli  $F$  budeme niekedy hovoriť ako o sčítovaní a násobení (súčte a súčine), presne tak ako je to v najzákladnejších príkladoch polí.

Aby bolo jasné, ktorá operácia sa vykoná najskôr, mali by sme používať zápis ako napríklad  $(a.b) + (c.d)$ . Budeme používať rovnakú konvenciu, aká je zaužívaná pre reálne čísla – operácia  $\cdot$  má vyššiu prioritu ako operácia  $+$ , teda predchádzajúci zápis môžeme stručnejšie zapísať ako  $ab + cd$ .

**Príklad 3.3.2.**  $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ ,  $(\mathbb{R}, +, \cdot)$  a  $(\mathbb{C}, +, \cdot)$  sú polia. Vlastnosti (i) a (ii) sme overili v časti o grupách (resp. v cvičeniach za ňou), zo strednej školy vieme, že pre tieto číselné obory platí aj distributívnosť.

Pole by sme mohli ekvivalentne definovať aj nasledujúcim spôsobom. (Všimnite si, že pojem grupy nám umožnil túto definíciu zapísať oveľa stručnejšie.)

**Definícia 3.3.3.** Pole je množina  $F$ , na ktorej sú definované 2 binárne operácie  $+$  a  $\cdot$  spĺňajúce:

- (i) pre všetky  $a, b, c \in F$  platí  $a + (b + c) = (a + b) + c$ ,
- (ii) pre všetky  $a, b \in F$  platí  $a + b = b + a$ ,
- (iii) existuje prvok  $0 \in F$  taký, že pre každé  $a \in F$  sa  $a + 0 = a$ ,
- (iv) ku každému  $a \in F$  existuje  $b \in F$  tak, že  $a + b = 0$ ,
- (v) pre všetky  $a, b, c \in F$  platí  $a.(b.c) = (a.b).c$ ,
- (vi) pre všetky  $a, b \in F$  platí  $a.b = b.a$ ,
- (vii) existuje prvok  $1 \in F$  taký, že  $1 \neq 0$  a pre každé  $a \in F$  sa  $a.1 = a$ ,
- (viii) ku každému  $a \in F$ ,  $a \neq 0$  existuje  $b \in F$  tak, že  $a.b = 1$ ,
- (ix) pre všetky  $a, b, c \in F$  sa  $a.(b + c) = a.b + a.c$ .

Overenie ekvivalentnosti týchto 2 definícií ponechávame ako cvičenie (úloha 3.3.1). Možno vám pri tom pomôžu niektoré zo základných vlastností poľa, ktoré odvodíme v nasledujúcom tvrdení. (My budeme používať definíciu 3.3.1. Samozrejme, akonáhle viete dokázať ekvivalenciu oboch definícií, môžete používať ktorúkoľvek z nich.)

**Tvrdenie 3.3.4.** *Nech  $(F, +, \cdot)$  je pole. Potom pre  $a, b, c \in F$  platí*

- (i)  $a \cdot 0 = 0, 0 \cdot a = 0,$
- (ii)  $a \cdot b = b \cdot a,$
- (iii)  $1 \cdot a = a \cdot 1 = a,$
- (iv)  $(-a) \cdot b = -a \cdot b,$
- (v)  $(-a) \cdot (-b) = a \cdot b,$
- (vi)  $a \cdot b = 0 \Rightarrow a = 0 \vee b = 0,$
- (vii)  $a \cdot b = a \cdot c \wedge a \neq 0 \Rightarrow b = c,$
- (viii)  $a \cdot a = a \Rightarrow a = 0 \vee a = 1.$

*Dôkaz.* (i) Rovnosť

$$0 + 0 = 0$$

vy násobíme zľava prvkom  $a$ . Po použití distributívneho zákona dostaneme

$$\begin{aligned} a \cdot 0 &= a \cdot (0 + 0) = a \cdot 0 + a \cdot 0 \\ a \cdot 0 &= 0 \end{aligned}$$

(V poslednej úprave sme využili zákon o krátení – môžeme ho použiť vďaka tomu, že  $(F, +)$  je grupa.)

Rovnosť  $0 \cdot a = 0$  sa ukáže takmer rovnako. (Prvkom  $a$  budeme násobiť sprava.)

(ii) Ak  $a$  aj  $b$  sú rôzne od nuly, tak tvrdenie vyplýva z komutatívnosti grupy  $(F \setminus \{0\}, \cdot)$ . Prípady, že niektoré z nich je nulové, je vyriešené v (i).

(iii) Ak  $a \neq 0$ , tak táto rovnosť vyplýva z toho, že  $1$  je neutrálny prvok grupy  $(F \setminus \{0\}, \cdot)$ . Pre  $a = 0$  máme  $1 \cdot 0 = 0 = 0 \cdot 1$  z (i).

(iv) Použitím distributívnosti a definície opačného prvku dostaneme

$$a \cdot b + (-a) \cdot b = (a + (-a)) \cdot b = 0 \cdot b \stackrel{(i)}{=} 0.$$

Teda  $(-a) \cdot b$  je skutočne opačný prvok k  $a \cdot b$ , čiže naozaj platí

$$(-a) \cdot b = -(a \cdot b).$$

(v) Dvojnásobným použitím rovnosti (iv) dostaneme

$$(-a) \cdot (-b) = -a \cdot (-b) = -(-a \cdot b) = a \cdot b.$$

(V poslednej rovnosti sme použili fakt, že  $-(-a) = a$ , čo je vlastne tvrdenie  $(a^{-1})^{-1} = a$  z vety 3.2.6 prepísané do aditívneho zápisu.)

(vi) Fakt, že  $\cdot$  je binárna operácia na množine  $F \setminus \{0\}$  (ktorý je v definícii 3.3.1 ukrytý v tom, že  $(F \setminus \{0\}, \cdot)$  je grupa) vlastne hovorí, že

$$a \neq 0 \wedge b \neq 0 \Rightarrow a \cdot b \neq 0.$$

Z tejto implikácie dostaneme tvrdenie (vi) ako obmenenú implikáciu.

(vii) Z rovnosti  $ab = ac$  dostaneme

$$a(b - c) = ab - ac = 0.$$

Pretože  $a \neq 0$ , z (vi) vyplýva  $b - c = 0$  a  $b = c$ .

(viii) Rovnosť  $a.a = a$  môžeme upraviť na tvar

$$a.a - a.1 = 0$$

$$a(a - 1) = 0$$

Na základe (vi) potom dostaneme  $a = 0$  alebo  $a = 1$ . □

Zistiť, že racionálne, reálne a komplexné čísla spĺňajú vlastnosti poľa bolo pomerne jednoduché. Ďalším základným príkladom poľa bude pre nás pole  $(\mathbb{Z}_p, \oplus, \odot)$ , kde  $p$  je prvočíslo. Teraz sa preto budeme venovať definícii operácií  $\oplus$  a  $\odot$  na množine  $\mathbb{Z}_n$  a dokážeme, že ak  $n$  je prvočíslo, tak to je skutočne pole.

**Definícia 3.3.5.** Nech  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 2$ . Množinu  $\mathbb{Z}_n$  definujeme ako  $\mathbb{Z}_n := \{0, 1, \dots, n - 1\}$ . (Teda množina  $\mathbb{Z}_n$  obsahuje všetky možné zvyšky po delení číslom  $n$ .)

Na množine  $\mathbb{Z}_n$  zavedieme operácie  $\oplus$  a  $\odot$  predpisom

$$a \oplus b = (a + b) \bmod n,$$

$$a \odot b = (ab) \bmod n,$$

kde operácia mod označuje zvyšok po delení číslom  $n$  (pozri dodatok A).

Delenie so zvyškom poznáte zo strednej školy, na pripomenutie si uvedme zopár príkladov.

**Príklad 3.3.6.** V tomto príklade budeme počítat v  $\mathbb{Z}_7$ .

$$2 \oplus 4 = 6$$

$$3 \oplus 6 = 2, \text{ pretože } 3 + 6 = 9 \text{ a zvyšok } 9 \text{ po delení } 7 \text{ je } 2 \text{ (} 9 = 1.7 + 2 \text{).}$$

$$2 \odot 3 = 6$$

$2 \odot 4 = 1$ , lebo  $2.4 = 8$  a  $8 = 1.7 + 1$  (Tým sme vlastne zistili, že 4 je inverzný prvok k 2 v poli  $\mathbb{Z}_7$ ; čiže  $2^{-1} = 4$  a  $4^{-1} = 2$ .)

$$3 \odot 6 = 4, \text{ pretože } 3.6 = 18 \text{ a } 18 = 2.7 + 4$$

Pokúsme sa vyrátať aj nejaký zložitejší výraz ako napríklad

$$3 \odot (4 \oplus 2) \oplus 5 \odot (3 \oplus 6) = 3 \odot 6 \oplus 5 \odot 2 = 4 \oplus 3 = 0.$$

Všimnime si, že ten istý výsledok by sme dostali, keby sme najprv použili obvyklé sčítanie aj násobenie a až na záver urobili zvyšok modulo 7.

$$3.(4 + 2) + 5.(3 + 6) = 3.6 + 5.9 = 18 + 45 = 63 = 9.7 + 0$$

Nie je to náhoda – takto to funguje vždy. Viac sa o tom môžete dočítať v dodatku A.

Ak budete mať na pamäti túto zákonitosť, môže vám to niekedy pomôcť pri výpočtoch operácií v  $\mathbb{Z}_n$ . Využijeme ju aj v nasledujúcom dôkaze (povinnom pre tých, ktorí si trúfajú na A-čko; jediná náročnejšia časť je tam dôkaz existencie inverzného prvku – overenie ostatných podmienok by mal zvládnuť každý).

Budeme potrebovať pripomenúť aj pojem prvočísla, ktorý poznáte zo strednej školy.

**Definícia 3.3.7.** Číslo  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n > 1$ , nazývame *zloženým číslom*, ak  $n = m.k$  pre nejaké  $m, k \in \mathbb{N}$  také, že  $1 < m, k < n$ .

Ak  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n > 1$ , nie je zložené, tak ho nazývame *prvočíslo*.

Číslo 1 nepovažujeme ani za prvočíslo ani za zložené číslo.

Inými slovami, číslo  $n$  je prvočíslo, ak nie je deliteľné žiadnymi inými prirodzenými číslami okrem 1 a  $n$ . Napríklad 9 je zložené číslo, lebo 9 je násobkom 3, ale 7 je prvočíslo (číslo 7 nie je deliteľné nijakým menším číslom okrem 1).



V dôkaze nasledujúcej vety budeme potrebovať túto dôležitú vlastnosť prvočísel:

$$p \mid mn \Rightarrow p \mid m \vee p \mid n,$$

t.j. ak je súčin dvoch čísel deliteľný prvočíslom  $p$ , musí  $p$  deliť jedno z týchto čísel. (Túto vlastnosť nebudeme dokazovať, mali by ste ju poznať zo strednej školy.)

**Veta 3.3.8.** Ak  $p$  je prvočíslo, tak  $(\mathbb{Z}_p, \oplus, \odot)$  je pole.

*Dôkaz.* Overíme podmienky (i,ii,iii) z definície 3.3.1.

$(\mathbb{Z}_p, \oplus)$  je komutatívna grupa

Ľahko vidno, že  $\oplus$  je binárna operácia na množine  $\mathbb{Z}_p$ .

*Asociatívnosť:* Pre ľubovoľné  $a, b, c \in \mathbb{Z}_p$  platí

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

(Pri poslednej úprave sme využili, že nezáleží na tom, že zvyšok po delení číslom  $p$  urobíme po každej operácii, alebo najprv urobíme obvyklé sčítovanie/násobenie a až z takto získaného výsledku urobíme zvyšok po delení číslom  $p$ .)

*Komutatívnosť:*

$$\begin{aligned} a + b &= b + a \\ (a + b) \bmod p &= (b + a) \bmod p \\ a \oplus b &= b \oplus a \end{aligned}$$

*Neutrálny prvok* je 0.

$$\begin{aligned} a + 0 &= a \\ (a + 0) \bmod p &= a \bmod p = a \\ a \oplus 0 &= a \end{aligned}$$

*Inverzný prvok* k  $a$  je  $(-a) \bmod p$ , čiže zvyšok čísla  $-a$  po delení  $p$ . Skutočne

$$a \oplus (-a) \bmod p = (a + ((-a) \bmod p)) \bmod p = (a + (-a)) \bmod p = 0 \bmod p = 0.$$

Všimnite si, že sme zatiaľ nikde nevyužili predpoklad, že  $p$  je prvočíslo. Táto prvá časť tvrdenia teda platí aj pre zložené čísla. Spomínaný predpoklad však budeme potrebovať v nasledujúcej časti dôkazu.

$(\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}, \odot)$  je komutatívna grupa

Pri dôkaze asociatívnosti, komutatívnosti a existencie neutrálneho prvku budeme postupovať takmer rovnako ako v predchádzajúcej časti. V tomto prípade však budeme musieť dať pozor aj na to, či  $\odot$  je skutočne binárna operácia na množine  $\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}$ .

*Binárna operácia:* Chceme ukázať, že ak  $a, b \in \mathbb{Z}_p \setminus \{0\}$ , tak  $a \odot b \neq 0$ . Ak by platilo  $a \odot b = (a \cdot b) \bmod p = 0$ , znamená to, že  $p \mid a \cdot b$  (zvyšok čísla  $a \cdot b$  po delení  $p$  je 0). Keďže  $p$  je prvočíslo, tak musí platiť  $p \mid a$  alebo  $p \mid b$ . Lenže v množine  $\mathbb{Z}_p \setminus \{0\} = \{1, 2, \dots, p-1\}$  nie je žiadny násobok  $p$ .

*Asociatívnosť:*

$$\begin{aligned} a.(b.c) &= (a.b).c \\ (a.(b.c)) \bmod p &= ((a.b).c) \bmod p \\ (a.(b.c) \bmod p) \bmod p &= ((a.b \bmod p).c) \bmod p \\ a \odot (b \odot c) &= (a \odot b) \odot c \end{aligned}$$

*Komutatívnosť:*

$$\begin{aligned} a.b &= b.a \\ (a.b) \bmod p &= (b.a) \bmod p \\ a \odot b &= b \odot a \end{aligned}$$

*Neutrálny prvok je 1:*

$$\begin{aligned} a.1 &= a \\ (a.1) \bmod p &= a \bmod p = a \\ a \odot 1 &= a \end{aligned}$$

*Existencia inverzného prvku.* Nech  $a \neq 0$ . Chceme vedieť, či existuje  $b \in \mathbb{Z}_p$  také, že  $a \odot b = 1$ . Najprv si všimnime, že pre  $k, l \in \mathbb{Z}_p$  platí implikácia

$$a \odot k = a \odot l \quad \Rightarrow \quad k = l$$

(inak povedané, môžeme krátiť nenulovým číslom.)

Ak  $(a.k) \bmod p = (a.l) \bmod p$ , čiže  $ak$  aj  $al$  dávajú rovnaký zvyšok po delení  $p$ , tak platí  $p \mid a.(k - l)$ . Pretože  $p$  je prvočíslo, nemá vlastných deliteľov, a teda musí deliť buď  $a$  alebo  $k - l$ . Pritom  $a \neq 0$  a iné násobky čísla  $p$  v  $\mathbb{Z}_p$  už nie sú. Teda  $p \mid k - l$ . Pretože  $k, l \in \mathbb{Z}_p$ , ich rozdiel je z množiny  $\{-(p-1), -(p-2), \dots, 0, 1, \dots, p-2, p-1\}$ . V tejto množine je jediným násobkom čísla  $p$  opäť nula, preto  $k - l = 0$  a  $k = l$ .

Implikácia, ktorú sme práve dokázali, ale znamená, že  $a \odot k$ , kde  $k \in \mathbb{Z}_p$ , nadobúda  $p$  rôznych hodnôt. (Nemôže nadobudnúť rovnakú hodnotu pre dve rôzne čísla  $k \neq k'$ .) Pre vhodné číslo  $k \in \mathbb{Z}_p$  sa teda objaví každá hodnota zo  $\mathbb{Z}_p$ , špeciálne aj 1, čo sme chceli dokázať.

*Distributívnosť:*

$$\begin{aligned} a.(b + c) &= ab + ac, \\ (a.(b + c)) \bmod p &= (ab + ac) \bmod p, \\ a \odot (b \oplus c) &= a \odot b \oplus a \odot c. \end{aligned}$$

□

Môžeme si všimnúť, že prvočíselnosť čísla  $p$  sme využívali iba v dvoch častiach dôkazu:  $\odot$  je binárna operácia na  $\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}$  a ku každému nenulovému prvku existuje inverzný.

Všimnite si tiež, že sme v najdôležitejšej časti dôkazu najprv dokázali zákon o krátení a z neho sme odvodili existenciu inverzného prvku. Tento postup súvisí s postupom, ktorý sa dá použiť v úlohe 3.2.14\*.

Tiež si môžeme všimnúť, že dôkaz je len existenčný – ukázali sme existenciu inverzných prvkov, ale v dôkaze sme neuviedli nijaký algoritmus, ako ich hľadať. Zatiaľ teda budeme postupovať tak, že jednoducho vyskúšame všetky možnosti (príklad 3.3.11), čo nie je až také hrozné, keď má pole, ktoré skúmame, málo prvkov. Iná možnosť, ako hľadať inverzný prvok,

by bolo použitie malej Fermatovej vety (príklad 3.3.13). Neskôr, na predmete Algebra 2, sa dozviete o Euklidovom algoritme na hľadanie najväčšieho spoločného deliteľa. Ten sa takisto dá použiť na tento účel.

Ak  $n$  je zložené,  $(\mathbb{Z}_n, \oplus, \odot)$  nie je pole.

Pozrime sa najprv na  $\mathbb{Z}_4$  s násobením modulo 4.

**Príklad 3.3.9.**  $(\mathbb{Z}_4, \oplus, \odot)$  nie je pole.

$\odot$	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	2	3
2	0	2	0	2
3	0	3	2	1

Z tabuľky si môžeme všimnúť, že neplatí viacero vlastností poľa:

- ku prvku 2 neexistuje inverzný prvok vzhľadom na operáciu  $\odot$ ;
- platí  $2 \odot 1 = 2 \odot 3$ , teda v  $\mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}$  neplatí zákon o krátení, čiže  $(\mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}, \odot)$  nie je grupa;
- rovnosť  $2 \odot 2 = 0$  ukazuje, že v  $\mathbb{Z}_4$  neplatí tvrdenie 3.3.4(vii).

Práve posledná zo spomenutých vlastností sa dá pomerne jednoducho zovšeobecniť na ľubovoľné zložené číslo.

**Príklad 3.3.10.** Ak  $n$  je zložené číslo, tak  $(\mathbb{Z}_n, \oplus, \odot)$  nie je pole.

Ak  $n$  je zložené, znamená to, že  $n = m \cdot k$  pre nejaké celé čísla  $m, k$  s vlastnosťou  $1 < m, k < n$ . Špeciálne to znamená, že  $m, k \in \mathbb{Z}_n \setminus \{0\}$ . Ak na obe strany rovnosti  $n = m \cdot k$  použijeme operáciu zvyšok po delení  $n$ , dostaneme

$$0 = m \odot k,$$

pričom  $m \neq 0$  a  $k \neq 0$ . Teda aj v tomto prípade sme zistili, že neplatí tvrdenie 3.3.4(vii) a  $(\mathbb{Z}_n, \oplus, \odot)$  nemôže byť pole.

Označenie  $\oplus$  a  $\odot$  korešponduje s našou dohodou, že v poli budeme používať aditívny zápis pre operáciu  $+$  a pre operáciu  $\cdot$  multiplikatívny zápis. (Jediný rozdiel je, že kvôli odlíšieniu týchto operácií ich dávame do krúžku.) V súlade s touto dohodou budeme označovať inverzný prvok  $k$  prvku  $a$  vzhľadom na operáciu  $\oplus$  ako  $-a$  a inverzný prvok vzhľadom na  $\odot$  ako  $a^{-1}$ .

V nasledujúcom príklade sa budeme zaoberať práve inverznými prvkami vzhľadom na operácie  $\oplus$  a  $\odot$  v poli  $\mathbb{Z}_p$ . (Pre jednoduchosť si vyberieme  $p = 7$ .)

**Príklad 3.3.11.** Na základe dohody o označovaní opačného prvku v  $\mathbb{Z}_7$  platí  $-1 = 6$ ,  $-2 = 5$ ,  $-3 = 4$ ,  $-4 = 3$ ,  $-5 = 2$ ,  $-6 = 1$ ,  $-0 = 0$ . (Teda inverzný prvok  $k$   $a \in \mathbb{Z}_7$  je  $7 - a$ .) V predchádzajúcom zápise  $-1$  neznamená celé číslo  $-1$  ale opačný prvok  $k$  prvku  $1 \in \mathbb{Z}_7$ .

Využívanie opačných prvkov môže niekedy zjednodušiť výpočty s operáciami  $\oplus$  a  $\odot$ . Napríklad v  $\mathbb{Z}_7$  máme

$$3 \odot 6 = 3 \odot (-1) = -3 = 4.$$

(Súčin  $3 \cdot (-1)$  sa vyráta ľahšie ako  $3 \cdot 6$ . Je to len ilustračný príklad – výraznejšie zjednodušenie to prinesie až vtedy, keď počítame viacero operácií a vychádzajú tam väčšie čísla.) Iný príklad:  $(2 \oplus 3) \odot (2 \odot 3) = 5 \odot 6 = (-2) \odot (-1) = 2 \odot 1 = 2$ . (Využili sme Tvrdenie 3.3.4(v). Pretože sme už dokázali, že  $\mathbb{Z}_7$  je pole, môžeme pri výpočtoch používať čokoľvek, čo sme dokázali o poliach vo všeobecnosti.)

Videli sme, že nájsť opačný prvok v  $\mathbb{Z}_7$  je jednoduché. S inverzným prvkom je to o niečo komplikovanejšie. Zatiaľ jediný spôsob, ako to môžeme urobiť je vyskúšať všetky možnosti. Skúsme napríklad vypočítať  $3^{-1}$  v  $\mathbb{Z}_7$ . Kandidáti na inverzný prvok sú 1,2,3,4,5,6. Vypočítame:

$$1 \odot 3 = 3$$

$$2 \odot 3 = 6$$

$$3 \odot 3 = 2$$

$$4 \odot 3 = 5$$

$$5 \odot 3 = 1$$

Na piaty pokus sa nám podarilo nájsť prvok, ktorý dáva v súčin s trojkou rovný 1. Teda práve tento prvok je inverzný k 3:

$$3^{-1} = 5.$$

Ak by sme boli o niečo pozornejší, mohli sme prestať už po druhom kroku. V ňom sme totiž dostali:

$$2 \odot 3 = 6 = -1$$

z čoho vyplýva

$1 = -(2 \odot 3) = (-2) \odot 3$ , čiže  $3^{-1} = -2 = 5$ . (Takto to funguje aj vo všeobecnosti – vždy nám stačí vyskúšať iba prvú polovicu možností, určite sa tam vyskytne buď 1 alebo  $-1$ .)

**Definícia 3.3.12.** Ak  $n$  je celé číslo a  $a, b$  sú prvky poľa  $F$ , tak definujeme  $n \times a$  takto:

$$0 \times a = 0,$$

$$(n+1) \times a = n \times a + a \text{ (zatiaľ sme to indukciou definovali pre prirodzené čísla),}$$

Ak  $n > 0$  tak definujeme  $(-n) \times a = -(n \times a)$  (tým sme rozšírili definíciu aj na záporné čísla).

Podobne definujeme pre  $a \neq 0$ :

$$a^0 = 1,$$

$$a^{n+1} = a^n \cdot a,$$

$$a^{-n} = (a^n)^{-1} \text{ (} n > 0 \text{)}.$$

Teda tvrdenie 3.3.4(viii) by sme mohli zapísať aj v tvare  $a^2 = a \Rightarrow a = 1 \vee a = 0$ . (Namiesto  $a \cdot a$  budeme stručnejšie písať  $a^2$ , pozri definíciu 3.3.12.)

Predchádzajúca definícia je príkladom definície matematickou indukciou (poznámka 2.1.5).

Menej formálne to môžeme vyjadriť ako  $n \times a = \underbrace{a + a + \dots + a}_{n\text{-krát}}$  a  $a^n = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n\text{-krát}}$ .

Nulu sme z definície  $a^n$  vynechali preto, že by bol problém definovať  $0^z$  pre  $z \leq 0$ . Pre prirodzené čísla je výraz  $0^n$  zmysluplný.

Niektoré základné vlastnosti týchto dvoch operácií nájdete v úlohe 3.3.5. (Viaceré z nich použijeme v nasledujúcom príklade.)

**Príklad 3.3.13.** Vypočítajme  $a^6$  pre prvky  $a \in \mathbb{Z}_7$ .

$$0^6 = 0$$

$$1^6 = 1$$

$$2^6 = (2^3)^2 = 1^2 = 1$$

$$3^6 = (3^2)^3 = 2^3 = 1$$

$$4^6 = (-3)^6 = 3^6 = 1$$

$$5^6 = (-2)^6 = 2^6 = 1$$

$$6^6 = (-1)^6 = 1^6 = 1$$

To, že pre všetky  $a \neq 0$  sme dostali  $a^6 = 1$  nie je náhoda. Pre ľubovoľné prvočíslo v poli  $\mathbb{Z}_p$  platí  $a^{p-1} = 1$  (pre nenulové  $a \in \mathbb{Z}_p$ ). Toto tvrdenie je známe ako *malá Fermatova veta*, stretnete sa s ním ešte viackrát. Teoreticko-číselný dôkaz môžete nájsť napríklad v [Č, Sle2].

Návod na iný dôkaz tejto vety (využívajúci algebraické idey) nájdete v úlohe 3.3.14 alebo [KGGG, 174/9\*].

Z rovnosti  $a^{p-1} = 1$  špeciálne vyplýva, že v  $\mathbb{Z}_p$  platí  $a^{-1} = a^{p-2}$ .

### Cvičenia

**Úloha 3.3.1.** Dokážte ekvivalenciu definície 3.3.1 a 3.3.3.

**Úloha 3.3.2.** Ktoré z uvedených množín tvoria spolu s obvyklým sčítaním a násobením pole?

a)  $F = \{a + ib; a \in \mathbb{R}, b \in \mathbb{R}, b \geq 0\}$

b)  $F = \{a + ib; a \in \mathbb{Q}, b \in \mathbb{Q}\}$

c)  $F = \{a + ib; a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}\}$

d)  $F = \{a + b\sqrt{5}; a \in \mathbb{Q}, b \in \mathbb{Q}\}$

e)  $F = \{a + \sqrt{3}ib; a \in \mathbb{Q}, b \in \mathbb{Q}\}$

f)  $F = \{a + \frac{b}{\sqrt{2}}; a, b, c \in \mathbb{Q}\}$

g\*)  $F = \{a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3} + d\sqrt{6}; a, b, c, d \in \mathbb{Q}\}$  (Hint: Možno pomôže prepísať si túto množinu do tvaru  $F = \{a + b\sqrt{3}; a, b \in F'\}$ , kde  $F' = \{a + b\sqrt{2}; a, b \in \mathbb{Q}\}$ .)

h\*)  $F = \{a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3}; a, b, c \in \mathbb{Q}\}$

i\*)  $F = \{a + b\sqrt[3]{5}; a \in \mathbb{Q}, b \in \mathbb{Q}\}$

**Úloha 3.3.3.** V poli  $\mathbb{Z}_5$  vyrátajte  $2^{-1} \oplus 4$ ,  $(-2) \oplus 4$ ,  $2^{-1} \odot 3$  a  $-4 \odot 3^{-1}$ .

**Úloha 3.3.4.** V  $\mathbb{Z}_5$  vyrátajte  $2^3$ ,  $(2^{-1})^4$ ,  $2 \odot (4^{-1})^3$ ,  $(4 \odot 2^{-1})^3$ ,  $(-1)^5 \odot (4 \odot 3^{-1})^2$ .

**Úloha 3.3.5.** Nech  $m, n$  sú celé čísla,  $a, b, b_1, \dots, b_n$  sú prvky poľa  $F$ . V úlohách f) až j) predpokladáme, že  $a \neq 0$ . Dokážte:<sup>2</sup>

a)  $m \times a + n \times a = (m + n) \times a$

b)  $m \times a + m \times b = m \times (a + b)$

c)  $m \times (n \times a) = (mn) \times a$

d)  $a \cdot (n \times b) = n \times (a \cdot b)$

e)  $(m \times a)(n \times b) = (mn) \times (a \cdot b)$

f)  $m \times (m \times a)^{-1} = a^{-1}$

g)  $a^m \cdot a^n = a^{m+n}$

h)  $a^m \cdot b^m = (a \cdot b)^m$

i)  $(a^m)^n = a^{mn}$

j)  $a^{2k} = (-a)^{2k}$

k)  $n \times 0 = 0$

l)  $1^n = 1$

**Úloha 3.3.6.** V ľubovoľnom poli  $F$  platí:

$$\begin{aligned} a + b = a + c &\Rightarrow b = c \\ (a + b)(c + d) &= ac + ad + bc + bd \\ -(-a) &= a \\ -0 &= 0 \end{aligned}$$

<sup>2</sup>Podúlohy by mali byť usporiadané tak, že ak v dôkaze niektorej z nich potrebujeme nejaké pomocné tvrdenie, máme ho už dokázané v niektorej z predchádzajúcich častí tejto úlohy. Ak by sa Vám zdalo, že poradie nie je správne, ozvite sa mi. Môžeme sa spolu pozrieť na to, či som sa pomýlil alebo či je dôvodom odlišného poradia to, že sa to dá dokazovať aj inak.

$$\begin{aligned}
-(a+b) &= (-a) + (-b) \\
(a-b)c &= ac - bc \\
1 &\neq 0 \\
a \cdot a = 1 &\Leftrightarrow a = 1 \vee a = -1 \\
a^2 = b^2 &\Leftrightarrow a = b \vee a = -b \\
a \cdot (b_1 + \dots + b_n) &= a \cdot b_1 + \dots + a \cdot b_n
\end{aligned}$$

**Úloha 3.3.7.** Na množine  $\mathbb{R}^+$  všetkých kladných reálnych čísel zadefinujeme operácie  $\oplus$  a  $\odot$  tak, že  $x \oplus y = x \cdot y$  a  $x \odot y = x^y$ . Ktoré z axióm poľa spĺňa  $(\mathbb{R}^+, \oplus, \odot)$ ?

**Úloha 3.3.8.** Nech  $F$  je pole a  $a \in F$ . Definujeme zobrazenie  $f_a: F \rightarrow F$  tak, že  $f_a(b) = a+b$ . Je  $f_a$  bijekcia? Ak áno, ako vyzerá zobrazenie  $f_a^{-1}$ ? Čomu sa rovná  $f_a \circ f_b$ ?

Dalej definujeme  $g_a: F \rightarrow F$  pre  $a \neq 0$  tak, že  $g_a(b) = a \cdot b$ . Je to bijekcia?

**Úloha 3.3.9.** Nech na množine  $M = \{0, 1\}$  sú operácie  $+$  a  $\cdot$  dané tabuľkami

$+$	0	1	$\cdot$	0	1
0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	1

Ukážte, že  $(M, +)$  a  $(M \setminus \{0\}, \cdot)$  sú komutatívne grupy a že platí distributívny zákon  $(a+b)c = ac + bc$ . Je  $(M, +, \cdot)$  pole?

**Úloha 3.3.10.** Zistite, či  $(\mathbb{R}, +, *)$ , kde  $+$  je obvyklé sčítanie reálnych čísel a pre každé  $a, b \in \mathbb{R}$   $a * b = -2ab$ , je pole.

**Úloha 3.3.11.** Na  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$  definujeme operácie  $+$  a  $\cdot$  takto:

- a)  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$  a  $(a, b) \cdot (c, d) = (ac, bd)$ ,
- b)  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$  a  $(a, b) \cdot (c, d) = (ac - bd, ad + bc)$ .
- c)  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$  a  $(a, b) \cdot (c, d) = (ac - bd, ad + bc - bd)$
- d)  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$  a  $(a, b) \cdot (c, d) = (bd - ac, ad + bc)$

Je potom  $(\mathbb{R} \times \mathbb{R}, +, \cdot)$  pole?

**Úloha 3.3.12\*.** Pre ktoré prvky  $a$  poľa  $\mathbb{Z}_7$  má riešenie rovnica  $x^2 = a$ ? Koľko je takých prvkov v poli  $\mathbb{Z}_{109}$ ?

**Úloha 3.3.13\*.** Dokážte, že:

- a) V ľubovoľnom poli platí  $(a+b)^m = a^m + \binom{m}{1} \times a^{m-1}b + \binom{m}{2} \times a^{m-2}b^2 + \dots + \binom{m}{m-1} ab^{m-1} + b^m$ . (Súčet na pravej strane sa zvykne označovať takto:  $\sum_{k=0}^m \binom{m}{k} \times a^{m-k} b^k$ .)
- b) V poli  $\mathbb{Z}_p$  platí:  $(a \oplus b)^p = a^p \oplus b^p$ .

**Úloha 3.3.14\*.** Pomocou úlohy 3.3.13 dokážte matematickou indukciou vzhľadom na  $a$ , že v  $\mathbb{Z}_p$  platí rovnosť  $a^p = a$  (pre ľubovoľné  $a \in \mathbb{Z}_p$ ). (Toto je vlastne iná formulácia malej Fermatovej vety.)

**Úloha 3.3.15.** Nech  $F$  je konečné pole a platí  $|F| = n$ . Ukážte, že potom pre každý prvok  $a \in F \setminus \{0\}$  platí  $a^{n-1} = 1$ . (Toto je vlastne špeciálny prípad úlohy 3.2.27. Týmto sme súčasne získali aj iné odvodenie malej Fermatovej vety.)

# Kapitola 4

## Vektorové priestory

### 4.1 Vektorový priestor

Na strednej škole ste sa už stretli s pojmom vektoru. Pracovali ste hlavne s vektormi v rovine a v trojrozmernom priestore. Tieto vektory budú tvoriť špeciálny prípad toho, čo budeme nazývať vektorový priestor.

Náš prístup bude opäť axiomatický, čo nám umožní používať dokázané výsledky okrem týchto vektorov aj na mnohé iné prípady. Okrem toho všeobecnosť našich úvah bude väčšia i vďaka tomu, že budeme pracovať nad ľubovoľným polom.

**Definícia 4.1.1.** Nech  $F$  je pole a  $V \neq \emptyset$  je množina. Nech  $+$  je binárna operácia na  $V$  a každej dvojici  $c \in F$ ,  $\vec{\alpha} \in V$  je priradený prvok  $c \cdot \vec{\alpha} \in V$ , pričom platí pre ľubovoľné  $c, d \in F$  a  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$ :

(i)  $(V, +)$  je komutatívna grupa,

(ii)  $c \cdot (\vec{\alpha} + \vec{\beta}) = c \cdot \vec{\alpha} + c \cdot \vec{\beta}$ ,

(iii)  $(c + d) \cdot \vec{\alpha} = c \cdot \vec{\alpha} + d \cdot \vec{\alpha}$ ,

(iv)  $(c \cdot d) \cdot \vec{\alpha} = c \cdot (d \cdot \vec{\alpha})$ ,

(v)  $1 \cdot \vec{\alpha} = \vec{\alpha}$ .

Potom hovoríme, že  $V$  je *vektorový priestor* nad polom  $F$ .

Namiesto  $c \cdot \vec{\alpha}$  budeme často používať stručnejší zápis  $c\vec{\alpha}$ .

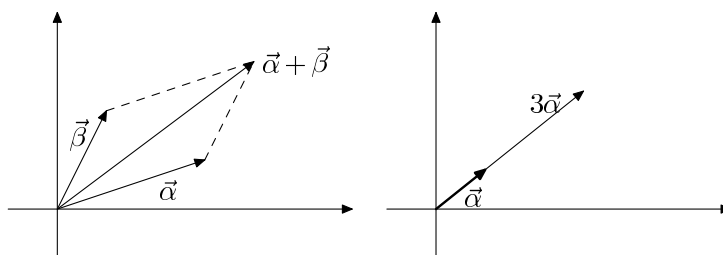
Prvky množiny  $V$  budeme nazývať *vektory* a spravidla ich budeme označovať gréckymi písmenami a šípkou. Pre prvky poľa  $F$  budeme niekedy používať termín *skaláry*.

Všimnite si, že hoci pre násobenie v poli  $F$  aj pre násobenie vektoru skalárom používame rovnaký symbol, z toho, medzi akými objektami sa tento symbol vyskytuje je jasné, ktorú z týchto dvoch možností máme na mysli. (Dalo by sa povedať, že vlastnosť (iv) z definície 4.1.1 hovorí o kompatibilitate týchto dvoch operácií.)

Neutrálny prvok komutatívnej grupy  $(V, +)$  budeme označovať  $\vec{0}$  a nazývať *nulový vektor*.

Inverzný prvok v grupe  $(V, +)$  budeme označovať  $-\vec{\alpha}$  a nazývame *opačný vektor* k vektoru  $\vec{\alpha}$ . Vektor  $\vec{\alpha} - \vec{\beta} := \vec{\alpha} + (-\vec{\beta})$  sa nazýva *rozdiel* vektorov  $\vec{\alpha}$  a  $\vec{\beta}$ .

**Príklad 4.1.2.** Vektory v rovine so sčítaním a násobením ako ho poznáte zo strednej školy, tvoria vektorový priestor nad polom  $\mathbb{R}$  (obr. 4.1).



Obr. 4.1: Operácie s vektormi v rovine

**Príklad 4.1.3.** Nech  $n \in \mathbb{N}$  a  $V = \mathbb{R}^n$ , teda  $V$  pozostáva z usporiadaných  $n$ -tíc reálnych čísel, kde  $n$  je nejaké prirodzené číslo. Potom  $\mathbb{R}^n$  je vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{R}$ .

Sčítovanie vektorov a násobenie skalárom definujeme po zložkách, čím sa myslí

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) + (y_1, y_2, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_n + y_n)$$

(teda sčítame príslušné súradnice oboch  $n$ -tíc)

$$c(x_1, x_2, \dots, x_n) = (cx_1, cx_2, \dots, cx_n)$$

(každú súradnicu vynásobíme skalárom  $c$ ).

Sčítovanie a násobenie použité na jednotlivých súradniciach je už obvyklé sčítovanie a násobenie reálnych čísel ( $c$ ,  $x_k$  aj  $y_k$  sú reálne čísla).<sup>1</sup>

Aby sme ukázali, že takto skutočne dostaneme vektorový priestor, treba overiť podmienky z definície 4.1.1. Princíp overenia je v podstate rovnaký u všetkých podmienok z tejto definície: aby sme overili rovnosť dvoch  $n$ -tíc, stačí overiť rovnosť na ľubovoľnej súradnici. Keď už pracujeme s niektorou konkrétnou súradnicou, dostaneme rovnosť v poli  $\mathbb{R}$ , ktorej platnosť vyplýva z toho, že  $\mathbb{R}$  spĺňa definíciu poľa.

Vlastnosť (i) sme už overovali v úlohe 3.2.10. Pretože dôkazy ostatných vlastností sú skutočne veľmi podobné, overme pre ilustráciu len vlastnosť (iii) z definície vektorového priestoru. Majme teda ľubovoľný vektor  $\vec{a} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$  a skaláry  $c, d \in F$ . Potom

$$(c + d)\vec{a} = ((c + d)x_1, \dots, (c + d)x_n) = (cx_1 + dx_1, \dots, cx_n + dx_n) = c\vec{a} + d\vec{a}.$$

(Rovnosť medzi súradnicovými vyjadreniami platí vďaka tomu, že  $c, d, x_i$  sú prvky poľa  $\mathbb{R}$ , teda rovnosť  $(c + d)x_i = cx_i + dx_i$  vyplýva z distributívneho zákona.)

V prípade  $n = 2$  dostaneme vektorový priestor  $\mathbb{R}^2$ , čo je vlastne vektorový priestor z predchádzajúceho príkladu v prípade, že vektory v rovine zapíšeme pomocou súradníc.

**Príklad 4.1.4.** Nech  $V = \{f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}\}$ , teda  $V$  je množina všetkých zobrazení z  $\mathbb{R}$  do  $\mathbb{R}$ . Túto množinu budeme obvykle označovať ako  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ .

Pre  $f, g \in V$  a  $c \in \mathbb{R}$  zadefinujeme sčítovanie a násobenie nasledovne:

$$\begin{aligned} (f + g)(x) &:= f(x) + g(x), \\ (c \cdot f)(x) &:= c \cdot f(x), \end{aligned}$$

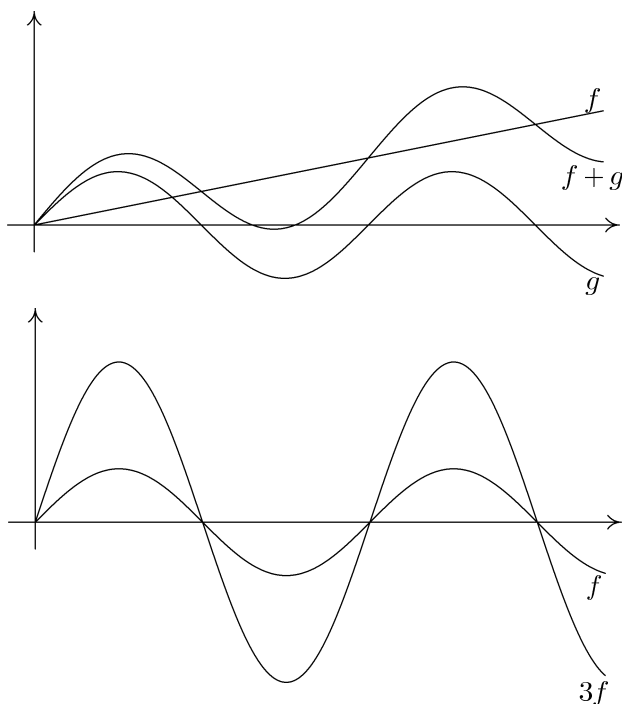
<sup>1</sup>Všimnite si, že symbol  $+$  používame v dvoch významoch: na ľavej strane rovnosti označuje operáciu na množine  $\mathbb{R}^n$  a na pravej strane rovnosti operáciu na  $\mathbb{R}$ . Podobne aj  $\cdot$  sa tu vyskytuje v dvoch rozličných významoch. Keby sme chceli byť veľmi dôslední, mali by sme pre operácie s  $n$ -ticami zaviesť iné označenie. S podobnou situáciou sme sa už stretli aj v prípade násobenia v poli a vo vektorovom priestore nad týmto poľom. Kvôli stručnosti a jednoduchosti označenia budeme často používať zápisy takéhoto typu. Treba si na to zvyknúť.



kde  $x \in \mathbb{R}$ . (Na vysvetlenie: v uvedených rovnostiach sú na ľavej strane operácie, ktoré definujeme. Na pravej strane rovnosti ide už o obvyklé sčítanie a násobenie reálnych čísel – vieme, že  $f(x), g(x) \in \mathbb{R}$ . Tým, že sme zadefinovali funkčnú hodnotu v každom bode  $x \in \mathbb{R}$ , sú zobrazenia  $f + g, c \cdot f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  jednoznačne určené. Symboly  $+$  a  $\cdot$  tu vystupujú opäť v dvoch rôznych významoch – podobne ako v predchádzajúcom príklade.)

Inak môžeme predchádzajúcu definíciu preformulovať tak, že v každom bode sčítame funkčné hodnoty resp. prenásobíme funkčnú hodnotu konštantou.

S týmito operáciami tvorí množina  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  vektorový priestor. Dôkaz tohoto faktu je do istej miery podobný ako pre priestor  $\mathbb{R}^n$ . V tomto prípade pri dôkaze vlastností vektorového priestoru overujeme rovnosť funkcií, čím sa dostaneme k rovnosti funkcií po dosadení ľubovoľného  $x \in \mathbb{R}$  a keď už pracujeme s funkčnými hodnotami, sú to prvky poľa  $\mathbb{R}$ , čiže môžeme využiť vlastnosti poľa (úloha 4.1.4).



Obr. 4.2: Operácie v priestore  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$

(V tomto prípade sme nepoužili označenie pomocou gréckych písmen, ale označenie, ktoré obvykle používame pre funkcie. Tento príklad by mal ilustrovať, že prvkami vektorového priestoru skutočne môžu byť najrozličnejšie objekty.)

**Poznámka 4.1.5.** Podobným spôsobom ako pre reálne čísla by sme mohli definovať vektorové priestory  $F^n$  a  $F^M$  nad ľubovoľným poľom  $F$  (pre akékoľvek prirodzené číslo  $n \in \mathbb{N}$ ; resp. pre akúkoľvek množinu  $M$ ). Overenie, že sú to naozaj vektorové priestory by bolo takmer rovnaké ako v prípade  $F = \mathbb{R}$ . (Všimnite si, že sme nepoužili žiadnu vlastnosť, ktorá by bola špecifická pre  $\mathbb{R}$  a neplatila v ľubovoľnom poli.) S priestorom  $F^n$  sa ešte stretneme neskôr.

Podobne ako v prípade polí budú nasledovať niektoré základné vlastnosti, ktoré sa dajú ľahko odvodiť priamo z definície vektorového priestoru.

**Veta 4.1.6.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad polom  $F$ ,  $c \in F$  a  $\vec{\alpha} \in V$ .

- (a)  $0 \cdot \vec{\alpha} = \vec{0}$ ,
- (b)  $c \cdot \vec{0} = \vec{0}$ ,
- (c)  $c \cdot \vec{\alpha} = \vec{0}$  práve vtedy, keď  $c = 0$  alebo  $\vec{\alpha} = \vec{0}$ ,
- (d)  $(-c) \cdot \vec{\alpha} = -c \cdot \vec{\alpha}$ .

*Dôkaz.* (a) Keď rovnosť  $0 = 0 + 0$  vynásobíme vektorom  $\vec{\alpha}$ , dostaneme

$$0 \cdot \vec{\alpha} = (0 + 0)\vec{\alpha} \stackrel{(iii)}{=} 0 \cdot \vec{\alpha} + 0 \cdot \vec{\alpha}$$

(Využili sme aj vlastnosť (iii) z definície vektorového priestoru.) Zo zákona o krátení (v grupe  $(V, +)$ ) dostaneme  $0 \cdot \vec{\alpha} = \vec{0}$ .

(b) Budeme postupovať veľmi podobne, tentokrát skalárom  $c \in F$  vynásobíme rovnosť  $\vec{0} = \vec{0} + \vec{0}$  a použijeme vlastnosť (ii) z definície vektorového priestoru. Dostaneme

$$c \cdot \vec{0} = c \cdot (\vec{0} + \vec{0}) \stackrel{(ii)}{=} c \cdot \vec{0} + c \cdot \vec{0},$$

z čoho vyplýva (opäť na základe zákona o krátení v grupe  $(V, +)$ ), že  $c \cdot \vec{0} = \vec{0}$ .

(c) Nech  $c \cdot \vec{\alpha} = \vec{0}$  a  $c \neq 0$ . Potom existuje k prvku  $c$  inverzný prvok  $c^{-1}$ . Vynásobením uvedenej rovnosti prvkom  $c^{-1}$  zľava dostaneme

$$c^{-1}(c \cdot \vec{\alpha}) = c^{-1} \cdot \vec{0}.$$

Ľavú stranu môžeme upraviť ako

$$c^{-1}(c \cdot \vec{\alpha}) \stackrel{(iv)}{=} (c^{-1} \cdot c)\vec{\alpha} = 1 \cdot \vec{\alpha} \stackrel{(v)}{=} \vec{\alpha}.$$

Pre pravú stranu máme

$$c^{-1} \cdot \vec{0} \stackrel{(b)}{=} \vec{0}$$

podľa prvej časti tejto vety. Dostali sme teda rovnosť  $\vec{\alpha} = \vec{0}$ .

(d) Jednoduchou úpravou dostaneme

$$c \cdot \vec{\alpha} + (-c) \cdot \vec{\alpha} \stackrel{(iii)}{=} (c - c)\vec{\alpha} = 0 \cdot \vec{\alpha} \stackrel{(a)}{=} \vec{0}.$$

□

### Cvičenia

**Úloha 4.1.1.** Nech  $\vec{\alpha} = (1, 3, 6)$ ,  $\vec{\beta} = (2, 1, 5)$ ,  $\vec{\gamma} = (4, -3, 3)$ . Vypočítajte  $7\vec{\alpha} - 3\vec{\beta} - 2\vec{\gamma}$ ,  $2\vec{\alpha} - 3\vec{\beta} + \vec{\gamma}$  vo vektorovom priestore  $\mathbb{R}^3$ .  $[(-7, 24, 21), (0, 0, 0)]$

**Úloha 4.1.2.** Ukážte, že  $F$  je vektorový priestor nad  $F$ .

**Úloha 4.1.3.** Nech  $V$  je množina všetkých postupností reálnych čísel. Pre postupnosti  $a = (a_n)_{n=1}^{\infty}$  a  $b = (b_n)_{n=1}^{\infty}$  definujeme  $a + b = (a_n + b_n)_{n=1}^{\infty}$  a  $c \cdot a = (c \cdot a_n)_{n=1}^{\infty}$ . Overte, že  $V$  s týmito operáciami tvorí vektorový priestor nad polom  $\mathbb{R}$ .

**Úloha 4.1.4.** Nech  $M$  je neprázdna množina,  $F$  je pole. Potom množina všetkých zobrazení  $f: M \rightarrow F$  so sčítaním a násobením definovaným po bodoch (pozri príklad 4.1.4) tvorí vektorový priestor nad poľom  $F$ . (Ak sa Vám zdá táto úloha príliš zložitá, riešte ju iba pre  $F = M = \mathbb{R}$ .)

Skúste si tiež uvedomiť, že týmto spôsobom sme súčasne overili, že priestory  $F^n$  (príklad 4.1.3 a poznámka 4.1.5),  $F^F$  (príklad 4.1.4 a poznámka 4.1.5) a postupnosti prvkov z  $F$  (úloha 4.1.3) tvoria vektorové priestory. (Postupnosti môžeme chápať ako zobrazenia z  $\mathbb{N}$  do  $F$ . Usporiadané  $n$ -tice môžeme chápať ako zobrazenia z  $\{1, 2, \dots, n\}$  do  $F$ .)

**Úloha 4.1.5.** Nech  $F$  je ľubovoľné pole a nech  $\vec{a}$  je ľubovoľný prvok. Nech  $V = \{c\vec{a}\}$ . Na  $V$  zavedieme operáciu sčítovania ako  $\vec{a} + \vec{a} = \vec{a}$  a násobenie skalárom  $c\vec{a} = \vec{a}$  (pre každé  $c \in F$ ). Dokážte, že  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ .

**Úloha 4.1.6.** Overte, že  $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$  so sčítaním a násobením skalárom definovaným po zložkách tvorí vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{Z}_2$ .

**Úloha 4.1.7.** Nech  $F$  je pole,  $V = F^n$ . Definujeme  $(x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n)$ ,  $c(x_1, \dots, x_n) = (cx_1, \dots, cx_n)$  pre  $c, x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n \in F$ . Potom  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ .

**Úloha 4.1.8.** Koľko prvkov má vektorový priestor  $(\mathbb{Z}_3)^n$ ? Čomu sa v tomto priestore rovná  $\vec{a} + \vec{a} + \vec{a}$ ?

**Úloha 4.1.9.** Overte, že všetky zobrazenia  $f: \langle 0, 1 \rangle \rightarrow \mathbb{R}$  so sčítaním a násobením skalárom definovaným po bodoch tvoria vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{R}$ .

**Úloha 4.1.10.** Overte, že  $\mathbb{R}$  je vektorový priestor nad  $\mathbb{Q}$ ,  $\mathbb{C}$  je vektorový priestor nad  $\mathbb{R}$ ,  $\mathbb{C}$  je vektorový priestor nad  $\mathbb{Q}$ . Je  $\mathbb{C}$  vektorový priestor nad  $\mathbb{Z}$ ?

**Úloha 4.1.11.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ ,  $c, c_1 \dots c_k \in F$ ,  $\vec{a}, \vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n \in V$ . Dokážte, že potom platí  $c(\vec{a}_1 + \dots + \vec{a}_n) = c\vec{a}_1 + \dots + c\vec{a}_n$ ,  $(c_1 + \dots + c_k)\vec{a} = c_1\vec{a} + \dots + c_k\vec{a}$ . Čomu sa rovná  $(c_1 + \dots + c_k)(\vec{a}_1 + \dots + \vec{a}_n)$ ?

**Úloha 4.1.12.** Dokážte, že vo vektorovom priestore  $V$  nad poľom  $F$  pre každé  $\vec{a}, \vec{\beta} \in V$ ,  $c \in F$  platí:

- $c(\vec{a} - \vec{\beta}) = c\vec{a} - c\vec{\beta}$
- $c(-\vec{a}) = -c\vec{a}$
- $(c - d)\vec{a} = c\vec{a} - d\vec{a}$
- $(-c)(-\vec{a}) = c\vec{a}$
- $-(\vec{a} + \vec{\beta}) = (-\vec{a}) + (-\vec{\beta})$
- $\vec{a} - (\vec{\beta} + \vec{\gamma}) = (\vec{a} - \vec{\beta}) - \vec{\gamma}$

**Úloha 4.1.13.** Pre celé číslo  $n$  a vektor  $\vec{a}$  definujeme  $n \times \vec{a}$  podobným spôsobom, ako sme definovali  $n \times a$  pre prvok  $a$  nejakého poľa  $F$ . Dokážte, že potom platí  $n \times (c\vec{a}) = c(n \times \vec{a})$ .

**Úloha 4.1.14.** Zistite, či  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$  s operáciami  $+$  a  $\cdot$  definovanými tak, že  $(a, b) + (c, d) = (a + c, b + d)$  pre ľubovoľné  $(a, b), (c, d) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}$  a  $r \cdot (a, b) = (ra, 2rb)$  pre ľubovoľné  $r \in \mathbb{R}$ , je vektorový priestor nad  $\mathbb{R}$ .

**Úloha 4.1.15.** Zistite, či  $(\mathbb{R}^+, \oplus, \odot)$  je vektorový priestor nad  $\mathbb{R}$ , ak definujeme  $x \oplus y = xy$ ,  $c \odot x = x^c$  pre  $x, y \in \mathbb{R}^+$ ,  $c \in \mathbb{R}$ .

## 4.2 Podpriestory

**Definícia 4.2.1.** Ak  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ ,  $S \neq \emptyset$  a  $S \subseteq V$ , tak  $S$  nazveme *podpriestorom* (alebo tiež *vektorovým podpriestorom*) priestoru  $V$ , ak

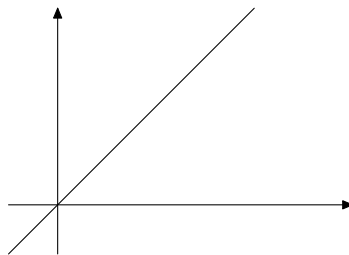
(i) pre ľubovoľné  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S$  platí  $\vec{\alpha} + \vec{\beta} \in S$ ,

(ii) pre ľubovoľné  $\vec{\alpha} \in S$  a  $c \in F$  platí  $c\vec{\alpha} \in S$ .

Inými slovami, podpriestor vektorového priestoru  $V$  je taká podmnožina  $S$ , ktorá je uzavretá vzhľadom na sčítanie aj vzhľadom na násobenie skalárom.

**Poznámka 4.2.2.** Všimnime si, že každý podpriestor  $S$  priestoru  $V$  musí obsahovať nulový vektor  $\vec{0}$ . Vyplyva to z toho, že  $S \neq \emptyset$ , teda obsahuje aspoň jeden vektor  $\vec{\alpha}$ . Z uzavretosti na násobenie skalárom vyplyva, že musí obsahovať aj vektor  $\vec{0} = 0 \cdot \vec{\alpha}$ .

**Príklad 4.2.3.** Priamku v rovine, ktorá prechádza počiatkom súradnicovej sústavy, môžeme chápať ako množinu vektorov (obrázok 4.3). Táto množina tvorí jej vektorový podpriestor.



Obr. 4.3: Priamka v rovine ako príklad vektorového podpriestoru

**Príklad 4.2.4.** Nech  $V = \mathbb{R}^3$  a <sup>2</sup>

$$S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; x + y + z = 0\}.$$

Potom  $S$  je podpriestor priestoru  $V$ . Overíme podmienky z definície podpriestoru.

Ak  $\vec{\alpha} = (x, y, z) \in S$  a  $\vec{\beta} = (x', y', z')$ , znamená to, že

$$\begin{aligned} x + y + z &= 0, \\ x' + y' + z' &= 0. \end{aligned}$$

Sčítaním týchto 2 rovníc dostaneme

$$(x + x') + (y + y') + (z + z') = 0,$$

preto aj vektor  $\vec{\alpha} + \vec{\beta} = (x + x', y + y', z + z')$  spĺňa podmienku, pomocou ktorej sme definovali podmnožinu  $S$ .

<sup>2</sup>Hoci v tomto príklade nám stačí overiť definíciu, nie je na škodu uvedomiť si aj to, čo predstavujú vektory zo zadaného podpriestoru geometricky. Zo strednej školy by ste mali vedieť, že pre ľubovoľné reálne čísla  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$  také, že  $(a, b, c) \neq 0$ , množina bodov z  $\mathbb{R}^3$  vyhovujúca rovnici  $ax + by + cz = d$  je rovina. Navyše viete, že  $(a, b, c)$  je normálový vektor tejto roviny. Teda v našom prípade máme rovinu kolmú na vektor  $(1, 1, 1)$  prechádzajúcu počiatkom súradnicovej sústavy.

Podobne ak by sme pracovali v  $\mathbb{R}^2$ , tak množina bodov v rovine vyhovujúcich rovnici  $ax + by = c$  (kde  $a, b \in \mathbb{R}$  sú nejaké reálne čísla a  $(a, b) \neq 0$ ), je priamka, ktorej normálový vektor je  $(a, b)$ .

Ak  $x + y + z = 0$ , tak prenasobením konštantou  $c$  dostaneme

$$cx + cy + cz = 0,$$

teda  $c\vec{\alpha} = (cx, cy, cz) \in S$ .

**Príklad 4.2.5.** Ak  $V$  je ľubovoľný vektorový priestor, tak  $S = \{\vec{0}\}$  je podpriestor priestoru  $V$ .

Skutočne, jediný možný súčet, ktorý môžeme dostať z prvkov  $S$  je  $\vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$ , a táto množina je uzavretá aj vzhľadom na násobenie skalárom,  $c\vec{0} = \vec{0}$ .

Ľahko sa dá overiť aj to, že  $V$  je podpriestor  $V$ , t.j. každý vektorový priestor je podpriestorom samého seba.

**Poznámka 4.2.6.** Ak  $S$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $F$ , tak aj  $S$  je vektorový priestor nad  $F$  (s operáciami rovnako definovanými ako v priestore  $V$ , inak povedané, „zdedenými“ z  $V$ ).

To nám dáva ďalšiu možnosť, ako overiť, že nejaká množina je vektorový priestor nad  $F$ . V prípade, že ide o podmnožinu nejakého iného vektorového priestoru (pre ktorý sme už overili všetky vlastnosti), stačí nám len overiť podmienky z definície podpriestoru.

Pri vysvetlení, prečo to platí, si môžeme uvedomiť aj o niečo všeobecnejšie pravidlá, ktoré fungujú pri overovaní axiém nejakého tvaru. Chceme overiť, či  $S$  je vektorový priestor – pri tom máme overiť viacero vlastností.

Ako prvé vlastnosti máme podmienky, že  $+$  je binárna operácia na  $S$  a násobenie má prvku  $c \in F$  a vektoru  $\vec{\alpha} \in S$  priradiť opäť prvok z  $S$ . To zabezpečia podmienky (i), (ii) z definície vektorového podpriestoru.

Ďalšou podmienkou je, že  $(V, +)$  je komutatívna grupa. Požiadavku asociatívnosti môžeme zapísať v tvare

$$(\forall \vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma} \in S)(\vec{\alpha} + \vec{\beta}) + \vec{\gamma} = \vec{\alpha} + (\vec{\beta} + \vec{\gamma}).$$

Teda je to výrok, ktorý hovorí, že pre všetky prvky z  $S$  má platiť nejaká rovnosť. Pretože ale už vieme, že táto vlastnosť platí pre ľubovoľné prvky z väčšej množiny  $V$ , tým skôr musí platiť pre ľubovoľné prvky z jej podmnožiny  $S$ .

Analogický argument samozrejme funguje aj pre každú vlastnosť, ktorú môžeme zapísať len pomocou všeobecného kvantifikátora a nejakej rovnosti. Vďaka tomu pre  $S$  nemusíme overovať ani vlastnosti (ii,iii,iv,v) z definície vektorového priestoru (definícia 4.1.1) a komutatívnosť operácie  $+$ .

Keď overujeme existenciu neutrálneho a inverzného prvku v  $(S, +)$ , sme v trochu inej situácii. Existenciu neutrálneho prvku môžeme zapísať v tvare

$$(\exists \vec{\varepsilon} \in S) (\forall \vec{\alpha} \in S) \vec{\varepsilon} + \vec{\alpha} = \vec{\alpha},$$

tentokrát v našej podmienke vystupuje okrem všeobecného kvantifikátora aj existenčný kvantifikátor. Z poznámky 4.2.2 vieme, že  $\vec{0}$  patrí do  $S$ . Vieme, že  $\vec{0}$  je neutrálny prvok vo  $(V, +)$ . Teda spĺňa podmienku

$$(\forall \vec{\alpha} \in S) \vec{0} + \vec{\alpha} = \vec{\alpha}.$$

O podmienkach takéhoto tvaru sme sa pred chvíľou už presvedčili, že sa dedia na podmnožiny. Súčasne vieme, že  $\vec{0} \in S$ . Preto  $\vec{0}$  je neutrálny prvok aj v  $(S, +)$ .

Existenciu inverzného prvku môžeme zapísať podmienkou

$$(\forall \vec{\alpha} \in S) (\exists \vec{\beta} \in S) \vec{\alpha} + \vec{\beta} = \vec{0},$$

ktorá hovorí, že ku každému vektoru  $\vec{\alpha}$  má existovať inverzný prvok na sčítovanie. Vieme však, že  $\vec{\alpha}$  má inverzný prvok  $-\vec{\alpha}$  vo  $(V, +)$ . Podobným spôsobom, akým sme dokázali jednoznačnosť neutrálneho prvku v tvrdení 3.1.12, by sme vedeli dokázať, že aj inverzný prvok v  $S$  musí byť ten istý, ako inverzný prvok vo  $V$ . Teda jediné, čo potrebujeme zistiť, je či aj vektor  $-\vec{\alpha}$  patrí do  $S$ . To však vyplýva z toho, že  $-\vec{\alpha} = (-1) \cdot \vec{\alpha}$ , teda podľa podmienky (i) patrí do  $S$ .

**Tvrdenie 4.2.7** (Kritérium vektorového podpriestoru). *Nech  $V$  je vektorový priestor nad polom  $F$  a  $S \subseteq V$ ,  $S \neq \emptyset$ . Potom  $S$  je podpriestor  $V$  práve vtedy, keď pre ľubovoľné  $c, d \in F$  a  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$  platí*

$$\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S \quad \Rightarrow \quad c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S. \quad (4.1)$$

*Dôkaz.* Ako sme už niekoľkokrát spomenuli, ekvivalenciu 2 výrokov môžeme dokázať tak, že dokážeme implikácie oboma smermi.

To, že  $S$  je neprázdna, overovať nemusíme, pretože táto podmienka sa vyskytuje v oboch prípadoch.

$\Rightarrow$  Ak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S$ , tak podľa (ii) platí  $c\vec{\alpha} \in S$  a  $d\vec{\beta} \in S$ . Z toho na základe (i) dostaneme  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S$ .

$\Leftarrow$  Ak množina  $S$  spĺňa podmienku (4.1), tak dosadením  $c = d = 1$  dostaneme, že  $S$  spĺňa (i). Ak zvolíme  $d = 0$ , dostaneme podmienku (ii).  $\square$

Ďalšia vlastnosť, ktorá bude pre nás užitočná, je fakt, že prienik dvoch podpriestorov vektorového priestoru je opäť podpriestor.

**Veta 4.2.8.** *Ak  $S$  a  $T$  sú podpriestory vektorového priestoru  $V$ , tak aj  $S \cap T$  je podpriestor  $V$ .*

*Dôkaz.* Pretože  $\vec{0} \in S$  aj  $\vec{0} \in T$ , platí  $\vec{0} \in S \cap T$ , čiže  $S \cap T \neq \emptyset$ .

Overíme podmienku (4.1). Ak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S \cap T$ , tak platí  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S$  (lebo  $S$  je podpriestor  $V$ ) a súčasne  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in T$  (lebo  $T$  je podpriestor  $V$ ). To znamená, že  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S \cap T$ .  $\square$

Tvrdenia takéhoto typu sa jednoduchým spôsobom dajú rozšíriť z dvoch objektov na ľubovoľný konečný počet. (Pokúste sa to overiť podrobne.)

**Dôsledok 4.2.9.** *Nech  $n \in \mathbb{N}$ . Ak  $S_1, S_2, \dots, S_n$  sú podpriestory priestoru  $V$ , tak aj  $\bigcap_{i=1}^n S_i$  je podpriestor priestoru  $V$ .*

Veľmi podobným spôsobom, ako sme dokázali vetu 4.2.8, sa dá overiť, že podobné tvrdenie platí aj pre nekonečne veľa podpriestorov.

**Veta 4.2.10.** *Nech  $I \neq \emptyset$  je ľubovoľná neprázdna množina a  $S_i$  je podpriestor priestoru  $V$  pre každé  $i \in I$ . Potom aj  $\bigcap_{i \in I} S_i$  je podpriestor priestoru  $V$ .*

*Dôkaz<sup>\Delta</sup>.* Označme  $S = \bigcap_{i \in I} S_i$ . Stačí si uvedomiť, že vektor  $\vec{\gamma} \in S$  práve vtedy, keď pre všetky  $i \in I$  platí  $\vec{\gamma} \in S_i$ . Na základe toho dostaneme

$$\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S \Rightarrow (\forall i \in I) \vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S_i \Rightarrow (\forall i \in I) c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S_i \Rightarrow c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} \in S.$$

Podľa tvrdenia 4.2.7 je teda  $S$  vektorový podpriestor priestoru  $V$ .  $\square$

**Cvičenia**

**Úloha 4.2.1.** Podrobne dokážte dôsledok 4.2.9.

**Úloha 4.2.2.** Dokážte, že množina všetkých funkcií  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , ktoré sú tvaru  $a + b \cos x + c \sin x$  pre nejaké  $a, b, c \in \mathbb{R}$  tvoria vektorový podpriestor priestoru všetkých reálnych funkcií  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ .

**Úloha 4.2.3.** Ktoré z týchto množín tvoria vektorový podpriestor priestoru  $\mathbb{R}^3$ ?

- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 \in \mathbb{Z}\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 = 0\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 = 0 \vee x_2 = 0\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; 3x_1 + 4x_2 = 1\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; 7x_1 - x_2 = 0\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 + x_2 = x_3\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; |x_1| = |x_2|\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 + x_2 + x_3 \geq 0\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; 2x_1 = -x_2 = x_3\}$
- $M = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3; x_1 + x_2 + x_3 = 0\}$ .

**Úloha 4.2.4.** Ktoré z týchto podmnožín tvoria vektorový podpriestor priestoru reálnych funkcií  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ ?

- funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  s vlastnosťou  $2f(0) = f(1)$
- nezáporné funkcie
- funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  s vlastnosťou  $f(1) = 1 + f(0)$
- funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  s vlastnosťou  $(\forall x \in \langle 0, 1 \rangle) f(x) = f(1 - x)$
- ohraničené funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
- spojité funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
- funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  také, že existuje konečná  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$
- i\*) funkcie  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  také, že existuje konečná alebo nekonečná  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$ .

**Úloha 4.2.5.** Overte, či

- množina všetkých polynómov s reálnymi koeficientami,
- množina všetkých polynómov s reálnymi koeficientami stupňa najviac  $n$ ,
- množina všetkých polynómov párneho stupňa,
- množina všetkých polynómov stupňa práve  $n$

sú vektorové priestory. Sčítovanie a násobenie skalárom definujeme rovnako ako pre reálne funkcie.

**Úloha 4.2.6.** Nech  $S, T$  sú podpriestory vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $F$ . Ukážte, že  $S \cup T$  je podpriestor priestoru  $V$  práve vtedy, keď  $S \subseteq T$  alebo  $T \subseteq S$ .

**Úloha 4.2.7.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$  a  $S \neq \emptyset$  je podmnožina  $V$ . Ukážte, že  $S$  je podpriestor  $V$  práve vtedy, keď pre ľubovoľné  $c \in F$  a  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in S$  platí  $c\vec{\alpha} + \vec{\beta} \in S$ .

## 4.3 Lineárna kombinácia, lineárna nezávislosť

### 4.3.1 Lineárna kombinácia a lineárny obal

**Definícia 4.3.1.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Hovoríme, že vektor  $\vec{\alpha}$  je *lineárnou kombináciou* vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ , ak existujú skaláry  $c_1, c_2, \dots, c_n \in F$  také, že

$$\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n.$$

Skaláry  $c_1, c_2, \dots, c_n$  nazývame *koeficienty lineárnej kombinácie*.

**Príklad 4.3.2.**  $(1, 0) + (0, 1) = (1, 1)$ , teda vektor  $(1, 1)$  je lineárna kombinácia vektorov  $(1, 0)$  a  $(0, 1)$  v  $\mathbb{R}^2$ .

$2 \cdot (1, 0, 0) + 3 \cdot (0, 1, 0) = (2, 3, 0)$ , teda vektor  $(2, 3, 0)$  je lineárna kombinácia vektorov  $(1, 0, 0)$  a  $(0, 1, 0)$  v  $\mathbb{R}^3$ .

**Tvrdenie 4.3.3.** *Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Ak  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$ , tak množina*

$$M = \{c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n; c_i \in F \text{ pre } i = 1, 2, \dots, n\}$$

je *podpriestor vektorového priestoru  $V$ .*

*Tento podpriestor nazývame lineárny obal vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$  alebo podpriestor generovaný vektormi  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Označujeme ho*

$$M =: [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n].$$

*Ak platí  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n] = V$ , hovoríme, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$  generujú vektorový priestor  $V$ .*

Definícia množiny  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n]$  vlastne hovorí, že  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n]$  je množina všetkých lineárnych kombinácií vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ .

*Dôkaz.* Aby sme dokázali, že  $M$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$ , stačí nám overiť, že táto množina je uzavretá na sčítovanie a skalárne násobky.

Ak máme dva vektory

$$\begin{aligned}\vec{\alpha} &= c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n \\ \vec{\beta} &= d_1\vec{\alpha}_1 + d_2\vec{\alpha}_2 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n\end{aligned}$$

tak aj vektor  $\vec{\alpha} + \vec{\beta} = c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n + d_1\vec{\alpha}_1 + d_2\vec{\alpha}_2 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n = (c_1 + d_1)\vec{\alpha}_1 + (c_2 + d_2)\vec{\alpha}_2 + \dots + (c_n + d_n)\vec{\alpha}_n$  má tvar, aký požadujeme v definícii množiny  $M$ . Takisto pre  $c \in F$  dostaneme

$$c\vec{\alpha} = c(c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n) = cc_1\vec{\alpha}_1 + cc_2\vec{\alpha}_2 + \dots + cc_n\vec{\alpha}_n,$$

čiže aj vektor  $c\vec{\alpha}$  patrí do  $M$ . □

**Príklad 4.3.4.** Pre vektorový priestor  $\mathbb{R}^3$  platí  $\mathbb{R}^3 = [(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)]$ .

Skutočne, ľubovoľný vektor  $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$  sa dá vyjadriť ako lineárna kombinácia  $x(1, 0, 0) + y(0, 1, 0) + z(0, 0, 1)$ .

Podobne sa dá dokázať, že  $[(1, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, 1)] = \mathbb{R}^n$ .

Na vygenerovanie podpriestoru  $S = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; x + y + z = 0\}$  dokonca stačia 2 vektory. Všimnime si, že rovnica  $x + y + z = 0$  je ekvivalentná s rovnicou  $z = -x - y$ , teda podpriestor  $S$  môžeme zapísať aj v tvare  $S = \{(x, y, -x - y); x, y \in \mathbb{R}\}$ . Teraz už vidíme, že každý vektor  $z \in S$  sa dá zapísať ako lineárna kombinácia  $(x, y, -x - y) = x(1, 0, -1) + y(0, 1, -1)$  a platí  $S = [(1, 0, -1), (0, 1, -1)]$ .

Všimnime si, že každý podpriestor, ktorý obsahuje vektory  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$  musí obsahovať aj všetky ich lineárne kombinácie (pretože ich vieme dostať opakovaním sčítovania a násobenia skalárom a na tieto 2 operácie sú podpriestory uzavreté). Teda podpriestory sú uzavreté vzhľadom na lineárne kombinácie vektorov. Toto tvrdenie sformalizujeme a dokážeme v nasledujúcej leme.



**Lema 4.3.5.** Ak  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n \in S$ , kde  $S$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$  nad polom  $F$ , aj ich ľubovoľná lineárna kombinácia  $c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$  patrí do podpriestoru  $S$ .

*Dôkaz.* Chceme ukázať, že ľubovoľné lineárna kombinácia  $c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k$  patrí do  $S$ . Budeme postupovať indukciou vzhľadom na  $k$ .

1° Pre  $k = 1$  prakticky niet čo dokazovať. (Dokazovaný výrok pre  $k = 1$  je  $\vec{\alpha} \in S \Rightarrow c\vec{\alpha} \in S$ .)

Pre  $k = 2$  dostaneme tvrdenie  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2 \in S \Rightarrow c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 \in S$ , ktoré vyplýva z kritéria vektorového podpriestoru (tvrdenie 4.2.7).

2° Predpokladajme, že tvrdenie platí pre lineárnu kombináciu  $k$  vektorov. Dokážeme, že platí aj pre  $(k + 1)$  vektorov.

$$c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_{k+1}\vec{\alpha}_{k+1} = \underbrace{(c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k)}_{\in S} + c_{k+1}\vec{\alpha}_{k+1} \in S$$

Podľa indukčného predpokladu lineárna kombinácia  $k$  vektorov (prvá zátvorka) patrí do  $S$  a po pripočítaní vektora  $c_{k+1}\vec{\alpha}_{k+1}$  (ktorý tiež patrí do  $S$ ) dostaneme opäť vektor z  $S$ .  $\square$

Táto lema vlastne hovorí, že podpriestor je uzavretý vzhľadom na tvorbu lineárnych kombinácií. Túto podmienku by sme mohli pridať ako ďalšiu ekvivalentnú podmienku hovoriacu, kedy je neprázdna podmnožina vektorového priestoru podpriestorom. (Zatiaľ máme dve takéto podmienky – definíciu podpriestoru a kritérium vektorového podpriestoru.)

**Veta 4.3.6.** Ak  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n \in S$ , kde  $S$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$  nad polom  $F$ , tak  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n] \subseteq S$ .

*Dôkaz.* Vyplýva z predchádzajúcej lemy.  $\square$

**Poznámka 4.3.7.** Predchádzajúca veta hovorí, že podpriestor  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n]$  je najmenší podpriestor priestoru  $V$ , ktorý obsahuje vektory  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ .

Pod slovom *najmenší* tu rozumieme, že ak  $S$  je taký podpriestor  $V$ , že  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n \in S$ , tak  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n] \subseteq S$ . (Často sa používa aj termín *najmenší vzhľadom na inklúziu*.)

Tento podpriestor je prienikom všetkých podpriestorov  $V$ , ktoré obsahujú vektory  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Pretože prienik podpriestorov je opäť podpriestor (veta 4.2.10) dostaneme takto podpriestor priestoru  $V$ . Pretože sme urobili prienik všetkých podpriestorov, je takto získaný prienik najmenší podpriestor vzhľadom na inklúziu, ktorý obsahuje  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ .

**Veta 4.3.8.** Nech  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$ ,  $\vec{\beta} \in V$ , kde  $V$  je vektorový priestor nad polom  $F$ . Potom  $\vec{\beta}$  je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$  práve vtedy, keď

$$[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n] = [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}].$$

*Dôkaz.*  $\Rightarrow$  Chceme ukázať rovnosť 2 množín – to môžeme dokazovať tak, že dokážeme obe inklúzie. Pritom inklúzia  $[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n] \subseteq [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}]$  je zrejماً. Opačná inklúzia vyplýva z toho, že ak máme nejaký vektor  $\vec{\gamma} \in [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}]$ , čo znamená, že

$$\vec{\gamma} = c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n + c\vec{\beta}$$

pre nejaké  $c_1, c_2, \dots, c_n, c \in F$  a ak vieme, že  $\vec{\beta}$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ , čiže

$$\vec{\beta} = d_1\vec{\alpha}_1 + d_2\vec{\alpha}_2 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n$$

pre nejaké  $d_1, d_2, \dots, d_n$ , tak úpravou dostaneme

$$\vec{\gamma} = c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n + cd_1\vec{\alpha}_1 + cd_2\vec{\alpha}_2 + \dots + cd_n\vec{\alpha}_n = (c_1 + cd_1)\vec{\alpha}_1 + (c_2 + cd_2)\vec{\alpha}_2 + \dots + (c_n + cd_n)\vec{\alpha}_n,$$

čo znamená, že

$$\vec{\gamma} \in [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n].$$

(Stručne: Lineárna kombinácia lineárnych kombinácií je opäť lineárna kombinácia.)

$\square$  Podľa predpokladu  $\vec{\beta} \in [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n]$ , teda  $\vec{\beta}$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n$ .  $\square$

### 4.3.2 Lineárna nezávislosť

V tejto podkapitole zdefinujeme pojem, ktorý bude pre nás v ďalšom štúdiu veľmi dôležitý.

**Definícia 4.3.9.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú *lineárne závislé*, ak existujú  $c_1, \dots, c_n \in F$ , ktoré nie sú všetky nulové a platí

$$c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}.$$

(Stručne:  $\vec{0}$  je nenulovou lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ .)

V opačnom prípade hovoríme, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  *lineárne nezávislé*.

**Príklad 4.3.10.** Najprv sa pozrime na niektoré špeciálne prípady. Ak  $n = 1$ , teda ak máme len jediný vektor  $\vec{\alpha}$ , tento vektor tvorí lineárne závislú množinu práve vtedy, keď  $\vec{\alpha} = \vec{0}$  (vyplýva to z vety 4.1.6 (c)).

Ak  $n = 2$ , čiže máme 2 vektory  $\vec{\alpha}$  a  $\vec{\beta}$ , tak sú lineárne závislé práve vtedy, keď jeden z nich je násobkom druhého, čiže  $\vec{\alpha} = c\vec{\beta}$  alebo  $\vec{\beta} = c\vec{\alpha}$  pre nejaké  $c \in F$  (úloha 4.3.8).

Vektory  $(0, 1), (1, 0), (1, 1) \in \mathbb{R}^2$  sú lineárne závislé, lebo  $1 \cdot (0, 1) + 1 \cdot (0, 1) - 1 \cdot (1, 1) = (0, 0)$ . (Nulový vektor v  $\mathbb{R}^2$  je  $(0, 0)$ .)

Ekvivalentne môžeme lineárnu nezávislosť definovať tak, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé práve vtedy, keď platí implikácia

$$c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0. \quad (4.2)$$

Táto formulácia lineárnej nezávislosti bude pre nás často výhodnejšia pri overovaní, či nejaké vektory sú lineárne nezávislé.

**Príklad 4.3.11.** Vektory  $(1, 0), (0, 1)$  vo vektorovom priestore  $\mathbb{R}^2$  sú lineárne nezávislé. Skutočne, z rovnosti  $c_1(1, 0) + c_2(0, 1) = (c_1, c_2) = (0, 0)$  vyplýva  $c_1 = c_2 = 0$ .

**Poznámka 4.3.12.** Aby sme si ozrejmili, že uvedené dve definície lineárnej nezávislosti sú skutočne ekvivalentné, potrebujeme si najprv pripomenúť, ako sa negujú výroky s kvantifikátormi.<sup>3</sup>

Pre negácie výrokov s kvantifikátormi platia dve jednoduché pravidlá (pozri 2.1.5):

$$\begin{aligned} \neg[(\forall x)P(x)] &\Leftrightarrow (\exists x)(\neg P(x)), \\ \neg[(\exists x)P(x)] &\Leftrightarrow (\forall x)(\neg P(x)). \end{aligned}$$

<sup>3</sup>Ako sme si už kedysi povedali, kvantifikátory sú len spôsobom na zápis istého druhu výrokov. Tu síce odvodíme ekvivalenciu týchto 2 definícií pomocou formálnych pravidiel pre prácu s kvantifikátormi, je to však presne to isté, čo dostaneme aj logickou úvahou, kvantifikátory nám poslúžia len na stručnejší, jednoduchší a prehľadnejší zápis týchto úvah.

(Teda existenčný kvantifikátor sa mení na všeobecný a obrátene a výrok pod kvantifikátorom sa zneguje.)

My by sme radi overili, či (4.2) je skutočne negáciou definície lineárne závislých vektorov. Pokúsme sa teda najprv prepísať definíciu lineárne závislých vektorov. (Snáď jediným drobným problémom je, ako zapísať, že aspoň jeden zo skalárov  $c_1, \dots, c_n \in F$  je nenulový.)

Spomínanú definíciu by sme mohli zapísať takto

$$(\exists c_1, \dots, c_n \in F)[c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = 0 \wedge (c_1 \neq 0 \vee c_2 \neq 0 \vee \dots \vee c_n \neq 0)].$$

Teraz už použitím pravidiel o negovaní výrokov s kvantifikátormi a de Morganových zákonov dostaneme

$$(\forall c_1, \dots, c_n \in F)[c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n \neq 0 \vee (c_1 = 0 \wedge c_2 = 0 \wedge \dots \wedge c_n = 0)].$$

Keď si uvedomíme, že  $\neg P \vee Q$  je vlastne iný zápis implikácie  $P \Rightarrow Q$  (inak povedané,  $(\neg P \vee Q) \Leftrightarrow (P \Rightarrow Q)$  je tautológia, pozri úlohu 2.1.1) vidíme, že sme dostali

$$(\forall n \in \mathbb{N})(\forall c_1, \dots, c_n \in F)(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = 0 \Rightarrow c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0),$$

čiže implikáciu (4.2).

Nasledujúce výsledky budú pre nás veľmi užitočné v nasledujúcej podkapitole.

**Veta 4.3.13.** *Nech  $V$  je vektorový priestor nad polom  $F$ . Nech  $n$  je prirodzené číslo,  $n \geq 2$  a  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$ . Vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne závislé práve vtedy, keď niektorý z nich je lineárnou kombináciou ostatných.*

*Dôkaz.*  $\Rightarrow$  Ak sú vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  lineárne závislé, znamená to, že platí rovnosť

$$c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}$$

pre nejaké  $c_1, \dots, c_n \in F$ , ktoré nie sú všetky nulové. Zvoľme si niektorý nenulový index  $c_i \neq 0$ . Pretože  $c_i \neq 0$ , existuje inverzný prvok  $c_i^{-1}$ . Úpravou predchádzajúcej rovnosti dostaneme

$$\begin{aligned} -c_i\vec{\alpha}_i &= c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_{i-1}\vec{\alpha}_{i-1} + c_{i+1}\vec{\alpha}_{i+1} + \dots + c_n\vec{\alpha}_n \\ -\vec{\alpha}_i &= c_i^{-1}c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_i^{-1}c_{i-1}\vec{\alpha}_{i-1} + c_i^{-1}c_{i+1}\vec{\alpha}_{i+1} + \dots + c_i^{-1}c_n\vec{\alpha}_n \\ \vec{\alpha}_i &= -c_i^{-1}c_1\vec{\alpha}_1 - \dots - c_i^{-1}c_{i-1}\vec{\alpha}_{i-1} - c_i^{-1}c_{i+1}\vec{\alpha}_{i+1} - \dots - c_i^{-1}c_n\vec{\alpha}_n \end{aligned}$$

Teda  $\vec{\alpha}_i$  je lineárna kombinácia ostatných vektorov.

$\Leftarrow$  Bez ujmy na všeobecnosti,<sup>4</sup> nech vektor, ktorý je lineárnou kombináciou ostatných, je vektor  $\vec{\alpha}_1$ . To znamená, že

$$\vec{\alpha}_1 = c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n,$$

čiže

$$-1 \cdot \vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}.$$

Zistili sme, že  $\vec{0}$  sa dá získať ako lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ , pričom hneď prvý koeficient  $-1$  je nenulový.  $\square$

<sup>4</sup>Frázu „bez ujmy na všeobecnosti“ nájdete v matematických textoch dosť často. Myslí sa tým, že použijeme dodatočný argument, ktorý môže o niečo zjednodušiť zápis dôkazu alebo dôkaz, ale je zrejmé, že analogický dôkaz by platil aj bez tohoto predpokladu. Napríklad v tomto prípade nám výber vektora  $\vec{\alpha}_1$  umožní jednoduchší zápis a navyše všeobecnú situáciu vieme previesť na tento prípad vhodným prečíslovaním vektorov. Iná možnosť by bola postupovať podobným postupom ako v predchádzajúcej časti dôkazu, znamenalo by to však o niečo komplikovanejší zápis.

**Veta 4.3.14.** *Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$  sú vektory také, že  $\vec{\alpha}_1 \neq \vec{0}$ . Vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne závislé práve vtedy, keď niektorý z nich je lineárnou kombináciou predchádzajúcich.*

*Dôkaz.* Implikácia  $\boxed{\Leftarrow}$  vyplýva z predchádzajúcej vety.

Implikáciu  $\boxed{\Rightarrow}$  dokážeme veľmi podobným spôsobom ako v predchádzajúcom dôkaze.

Ak vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne závislé, znamená to podľa (4.2), že

$$c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}$$

pre nejaké  $c_1, \dots, c_n \in F$ , pričom aspoň jedno  $c_i$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  je nenulové.

Nech  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$  je posledný index z tejto množiny, pre ktorý je  $c_k$  nenulové. (Taký index existuje, pretože množina  $\{1, 2, \dots, n\}$  je konečná. Navyše, platí  $k \geq 2$ , pretože  $\vec{\alpha}_1 \neq \vec{0}$ .)

Potom predchádzajúcu rovnicu môžeme prepísať do tvaru

$$c_1\vec{\alpha}_1 + c_2\vec{\alpha}_2 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k = \vec{0}$$

a úpravou dostaneme

$$c_k\vec{\alpha}_k = -c_1\vec{\alpha}_1 - c_2\vec{\alpha}_2 - \dots - c_{k-1}\vec{\alpha}_{k-1}.$$

Pretože  $c_k \neq 0$ , existuje inverzný prvok  $c_k^{-1}$ . Keď predchádzajúcu rovnosť prenásobíme  $c_k^{-1}$  dostaneme

$$\vec{\alpha}_k = -c_k^{-1}c_1\vec{\alpha}_1 - c_k^{-1}c_2\vec{\alpha}_2 - \dots - c_k^{-1}c_{k-1}\vec{\alpha}_{k-1},$$

teda  $\vec{\alpha}_k$  je skutočne lineárnou kombináciou predchádzajúcich vektorov.  $\square$

Nasledujúca veta bude kľúčová pri definovaní dimenzie vektorového priestoru v nasledujúcej kapitole.

**Veta 4.3.15** (Steinitzova veta o výmene). *Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Ak  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  (vektorový priestor  $V$  je generovaný vektormi  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ ) a  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s \in V$  sú lineárne nezávislé vektory, tak*

(i)  $s \leq n$ ,

(ii) z vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sa dá vybrať  $n - s$  vektorov, ktoré spolu s vektormi  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  generujú  $V$ .

V prípade, že vám nie je úplne jasné, čo hovorí táto veta, môžete sa pozrieť na príklad 4.3.16, prípadne si vyskúšať urobiť ďalšie podobné príklady sami.

*Dôkaz.* Matematickou indukciou vzhľadom na  $s$ .

1° Najprv uvažujme prípad, že  $s = 1$ . Vektor  $\vec{\beta}_1$  je lineárne nezávislý, teda nenulový. Pretože  $\vec{\beta}_1 \in V$ , je vektor  $\vec{\beta}_1$  lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ . To znamená, že vektory  $\vec{\beta}_1, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne závislé. Preto niektorý z nich je lineárnou kombináciou predchádzajúcich. Pritom to nemôže byť vektor  $\vec{\beta}_1$ , lebo  $\vec{\beta}_1 \neq \vec{0}$ .

Ak  $\vec{\alpha}_i$  je lineárna kombinácia predchádzajúcich vektorov, tak podľa vety 4.3.8  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = [\vec{\beta}_1, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = [\vec{\beta}_1, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{i-1}, \vec{\alpha}_{i+1}, \dots, \vec{\alpha}_n]$ .

Pretože  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  obsahuje aspoň jeden nenulový vektor  $\vec{\beta}_1$ , platí  $V \neq \{\vec{0}\}$  a  $n \geq 1$ .

2° Predpokladajme, že tvrdenie platí pre číslo  $s$ . Budeme sa snažiť dokázať, že platí aj pre  $s + 1$ .

Máme teda daných  $s+1$  lineárne nezávislých vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1} \in V$ . Podľa indukčného predpokladu vieme vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  doplniť  $n-s$  vektormi spomedzi vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  tak, aby generovali celý priestor. Ďalej platí  $s \leq n$ .

Predpokladajme, že by platilo  $s = n$ . To by znamenalo, že (podľa indukčného predpokladu) sa dajú vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  doplniť  $n-s = 0$  vektormi, čiže  $V = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s]$ . Pretože  $\vec{\beta}_{s+1} \in [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s]$ , vektor  $\vec{\beta}_{s+1}$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$ , čo je spor s tým, že vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}$  sú lineárne nezávislé. Musí teda platiť  $s < n$ , čiže

$$s + 1 \leq n.$$

Bez ujmy na všeobecnosti môžeme predpokladať, že vektory, ktorými môžeme doplniť  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  sú vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-s}$ . (Takúto situáciu vieme dosiahnuť vhodným prečíslovaním vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ .) Platí teda  $\vec{\beta}_{s+1} \in V = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-s}]$ .

Z toho vyplýva, že vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-s}$  sú lineárne závislé, čiže niektorý z nich je lineárnou kombináciou predchádzajúcich vektorov. Nemôže to však byť žiadny z vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}$ , lebo tieto vektory sú lineárne nezávislé. Musí to byť niektorý z  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-s}$ , bez ujmy na všeobecnosti nech je to  $\vec{\alpha}_{n-s}$ . Z vety 4.3.8 potom dostaneme

$$V = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-s}] = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-(s+1)}].$$

□

Z dôkazu môžeme vidieť, prečo sa predchádzajúca veta nazýva veta o výmene. V indukčnom kroku sme vymenili jeden z vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  za vektor  $\vec{\beta}_{s+1}$ .

Všimnime si, že na konci predchádzajúceho dôkazu môže nastať aj situácia  $n = s + 1$ , vtedy zápis  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{n-(s+1)}$  predstavuje 0 vektorov. Možno trochu neobvyklý zápis – ale dá sa ľahko si uvedomiť, že prípad  $n = s + 1$  by fungoval v podstate rovnako. (Nie sú tam problémy s tým, že by sme uvažovali lineárny obal prázdnej množiny vektorov – sú tam totiž aj vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_{s+1}$ .)

Podobne podmienka  $n \geq 2$  vo vete 4.3.13 a podmienka  $\vec{\alpha}_1 \neq \vec{0}$  vo vete 4.3.14 slúžia práve nato, aby sme sa vyhli prípadu, že v dôkaze (alebo už priamo v tvrdení vety) sa vyskytne lineárny obal prázdnej množiny vektorov (ten sme totiž nedefinovali). Môžete si rozmyslieť, že keby sme defínitoricky položili  $[\emptyset] = \{\vec{0}\}$ , teda lineárny obal prázdnej množiny by bol nulový vektorový priestor, prešli by dôkazy týchto viet aj po vynechaní spomínaných podmienok.

Cieľom nasledujúceho príkladu, ktorým uzavrieme túto podkapitolu, je ilustrovať (na konkrétnych príkladoch), čo hovorí Steinitzova veta o výmene.

**Príklad 4.3.16.** Budeme pracovať vo vektorovom priestore  $V = \mathbb{R}^3$  nad poľom  $\mathbb{R}$ .

a) Zvoľme  $\vec{\alpha}_1 = (1, 0, 0)$ ,  $\vec{\alpha}_2 = (0, 1, 0)$  a  $\vec{\alpha}_3 = (0, 0, 1)$ . Platí  $V = [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \vec{\alpha}_3]$  (pozri príklad 4.3.4). Ďalej nech  $\vec{\beta}_1 = (1, 1, 0)$  a  $\vec{\beta}_2 = (1, 0, 1)$ . Tieto dva vektory sú lineárne nezávislé, lebo ani jeden z nich nie je násobok toho druhého.

Podľa vety 4.3.15 môžeme k vektorom  $\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2$  pridať niektorý z vektorov  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \vec{\alpha}_3$  tak, aby sme dostali trojicu vektorov, ktorá generuje  $V$ . Vyskúšajme pridať napríklad  $\vec{\alpha}_1$ . Chceme overiť, či platí  $V = [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_1]$ . Na to nám stačí ukázať, že  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \vec{\alpha}_3 \in [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_1]$ .

Skutočne máme

$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= \vec{\alpha}_1, \\ \vec{\alpha}_2 &= (1, 1, 0) - (1, 0, 0) = \vec{\beta}_1 - \vec{\alpha}_1, \\ \vec{\alpha}_3 &= (1, 0, 1) - (1, 0, 0) = \vec{\beta}_2 - \vec{\alpha}_1,\end{aligned}$$

čiže všetky tieto vektory vieme získať ako lineárne kombinácie  $\vec{\beta}_1$ ,  $\vec{\beta}_2$  a  $\vec{\alpha}_1$ . To znamená, že  $V = [\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \vec{\alpha}_3] \subseteq [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_1]$ .

Môžete sa presvedčiť o tom, že v tomto prípade by sme dokonca dostali celý priestor aj vtedy, ak by sme namiesto  $\vec{\alpha}_1$  použili vektor  $\vec{\alpha}_2$  či vektor  $\vec{\alpha}_3$ . Takéto niečo však Steinitzova veta netvrdí – tá zaručuje len to, že aspoň jeden z týchto troch vektorov musí fungovať. Skúsme si teda ukázať ešte nejaký príklad, kde nie je úplne jedno, ktorý vektor si vyberieme na doplnenie.

b) Nech opäť me  $\vec{\alpha}_1 = (1, 0, 0)$ ,  $\vec{\alpha}_2 = (0, 1, 0)$  a  $\vec{\alpha}_3 = (0, 0, 1)$ , ale tentokrát  $\vec{\beta}_1 = (1, 1, 0)$ ,  $\vec{\beta}_2 = (0, 1, 0)$ . Vektory  $\vec{\beta}_1$  a  $\vec{\beta}_2$  sú lineárne nezávislé.

Ak k vektorom  $\vec{\beta}_{1,2}$  pridáme jeden z vektorov  $\vec{\alpha}_{1,2}$ , tak nedostaneme celý priestor  $V$ . Z rovností

$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= \vec{\beta}_1 - \vec{\beta}_2 \\ \vec{\alpha}_2 &= \vec{\beta}_2\end{aligned}$$

totiž vidíme, že vektory  $\vec{\alpha}_{1,2}$  sú lineárne kombinácie vektorov  $\vec{\beta}_1$  a  $\vec{\beta}_2$ . Teda podľa vety 4.3.8  $[\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2] = [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_1] = [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_2]$  a ľahko sa dá presvedčiť o tom, že tento podpriestor neobsahuje vektor  $\vec{\alpha}_3$ . (Všetky vektory z tohoto podpriestoru majú tretiu súradnicu nulovú.)

Ak však pridáme vektor  $\vec{\alpha}_3$ , tak už dostaneme celý priestor  $V = [\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2, \vec{\alpha}_3]$ . Platí totiž

$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= \vec{\beta}_1 - \vec{\beta}_2 \\ \vec{\alpha}_2 &= \vec{\beta}_2 \\ \vec{\alpha}_3 &= \vec{\alpha}_3\end{aligned}$$

čiže každý z vektorov  $\vec{\alpha}_{1,2,3}$  vieme dostať ako lineárnu kombináciu  $\vec{\beta}_1$ ,  $\vec{\beta}_2$  a  $\vec{\alpha}_3$ .

### Cvičenia

**Úloha 4.3.1.** Dokážte, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$ , kde  $n \geq 2$  a  $\vec{\alpha}_n \neq \vec{0}$ , sú lineárne závislé práve vtedy, keď niektorý z nich je lineárnou kombináciou nasledujúcich.

**Úloha 4.3.2.** Nech  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$  sú ľubovoľné vektory z vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $\mathbb{R}$ . Potom  $[\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}] = [\vec{\alpha} + \vec{\beta}, \vec{\alpha} - \vec{\beta}, \vec{\gamma}]$ .

**Úloha 4.3.3.** Nech  $M = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; 2x + 3y + 5z = 0\}$ . Ukážte, že  $M$  je vektorový podpriestor  $\mathbb{R}^3$  a nájdite vektory, ktoré ho generujú.

**Úloha 4.3.4.**  $P_n$  označme množinu všetkých polynómov stupňa najviac  $n$  s reálnymi koeficientami.  $P_n$  je podpriestor vektorového priestoru všetkých zobrazení  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Platí  $P_n = [1, x, \dots, x^n]$ ?

**Úloha 4.3.5.** Zistite, či dané vektory sú lineárne závislé v príslušnom vektorovom priestore:

- $(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 5)$  v  $\mathbb{R}^3$ ,
- $(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 5), (1, 127, 3)$  v  $\mathbb{R}^3$ ,
- $(1, 3, 4), (2, 1, 3), (3, 1, 4)$  v  $\mathbb{Z}_5^3$ ,
- $(1, 3, 4), (2, 1, 3), (3, 1, 4)$  v  $\mathbb{Z}_7^3$ .

**Úloha 4.3.6.** Zistite, či sú nasledujúce funkcie lineárne závislé vo vektorovom priestore všetkých funkcií z  $\mathbb{R}$  do  $\mathbb{R}$ :

- $x + 1, x^2, x^3$ ,
- $1, x + a, x^2 + bx + c$  ( $a, b, c$  môžu byť ľubovoľné reálne čísla),

- c\*)  $1, \cos x, \cos^2(\frac{x}{2})$ ,  
 d)  $x, x(x-1), x(x-1)(x-2)$ ,  
 e)  $1, \cos x, \cos 2x$ .

**Úloha 4.3.7.** Ak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$  sú lineárne nezávislé vo vektorovom priestore  $V$  nad poľom  $\mathbb{R}$ , tak aj  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}, \vec{\alpha} + \vec{\gamma}, \vec{\beta} + \vec{\gamma}$  sú lineárne nezávislé. (Platilo by to aj vo vektorovom priestore nad poľom  $\mathbb{Z}_2$ ?)

**Úloha 4.3.8.** Množina  $\{\vec{\alpha}\}$  je lineárne nezávislá práve vtedy, keď  $\vec{\alpha} \neq \vec{0}$ . Dva vektory  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  sú lineárne závislé práve vtedy, keď jeden z nich je násobkom druhého (t.j. existuje  $c \in F$  tak, že  $c \cdot \vec{\alpha} = \vec{\beta}$ ), alebo jeden z nich je  $\vec{0}$ .

Ak vektory  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  sú lineárne nezávislé, tak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$  sú lineárne závislé práve vtedy, keď  $\vec{\gamma}$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}$ .

**Úloha 4.3.9\*.** Overte, že  $\mathbb{R}$  je vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{Q}$ . Dokážte, že v tomto priestore sú  $1, \sqrt{2}$  a  $\sqrt{3}$  lineárne nezávislé.

**Úloha 4.3.10.** Ukážte, že vo vektorovom priestore  $\mathbb{R}$  nad  $\mathbb{Q}$  (z predošlej úlohy) sú lineárne nezávislé vektory  $1 + 3\sqrt{2}$  a  $2 - \sqrt{2}$ .

**Úloha 4.3.11\*.** Sú  $1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6}$  lineárne nezávislé vo vektorovom priestore  $\mathbb{R}$  nad poľom  $\mathbb{Q}$ ? (Hint: Úlohu môže o niečo zjednodušiť, ak sa pozriete na  $1$  a  $\sqrt{3}$  ako prvky priestoru  $\mathbb{R}$  nad poľom  $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \{a + b\sqrt{2}; a, b \in \mathbb{Q}\}$ .)

**Úloha 4.3.12.** Nech  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$  sú ľubovoľné vektory. Zistite, či sú tieto systémy vektorov lineárne závislé:

- a)  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\alpha} + \vec{\beta}, \vec{\gamma}$ , b)  $\vec{\alpha}, \vec{\beta}, 0$ , c)  $\vec{\alpha}, \vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$ , d)  $\vec{\alpha} + \vec{\beta} + \vec{\gamma}, \vec{\alpha} + \vec{\beta}, \vec{\alpha} + \vec{\gamma}, \vec{\beta} + \vec{\gamma}$ .

**Úloha 4.3.13.** Nájdite 4 vektory v  $\mathbb{R}^2$  tak, aby každé dva z nich boli lineárne nezávislé.

**Úloha 4.3.14.** Nech vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé vektory v nejakom vektorovom priestore nad poľom  $\mathbb{R}$ . Sú aj vektory  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_1 + 2\vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_1 + 2\vec{\alpha}_2 + \dots + n\vec{\alpha}_n$  lineárne nezávislé?

## 4.4 Báza a dimenzia

V tejto podkapitole zadefinujeme pojmy báza a dimenzia vektorového priestoru. Pri dôkazoch základných výsledkoch o nich bude pre nás základným prostriedkom Steinitzova veta o výmene.

**Definícia 4.4.1.** Nech  $V$  je vektorový priestor. Hovoríme, že  $V$  je *konečnorozmerný* ak existuje taká konečná množina vektorov  $\{\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n\}$ , že platí  $[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = V$ .

Inými slovami: konečnorozmerný vektorový priestor je priestor, ktorý je generovaný nejakou konečnou množinou vektorov.

**Definícia 4.4.2.** Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$ . Množinu vektorov  $\{\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n\}$  nazývame *bázou* priestoru  $V$ , ak

- (i) vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé,  
 (ii)  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ .

(Stručne: Báza je taká množina lineárne nezávislých vektorov, ktorá generuje celý priestor.)

**Príklad 4.4.3.** Priestor  $V = \{\vec{0}\}$  nemá bázu (pretože v ňom neexistujú žiadne lineárne nezávislé vektory). Je však konečnorozmerný, keďže  $V = [\vec{0}]$ .

**Príklad 4.4.4.** Nech  $F$  je pole. Ako  $F^n$  budeme označovať vektorový priestor všetkých usporiadaných  $n$ -tíc prvkov poľa  $F$ . Sčítovanie a násobenie skalárom definujeme po súradniciach (podobne ako v príklade 4.1.4 pre  $F = \mathbb{R}$ ).

Ako  $\vec{\varepsilon}_i$  označíme vektor, ktorý má na všetkých súradniciach 0, iba na  $i$ -tej súradnici 1, teda

$$\begin{aligned}\vec{\varepsilon}_1 &= (1, 0, \dots, 0), \\ \vec{\varepsilon}_2 &= (0, 1, \dots, 0), \\ &\dots \\ \vec{\varepsilon}_n &= (0, \dots, 0, 1).\end{aligned}$$

Vektory  $\vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \dots, \vec{\varepsilon}_n$  tvoria bázu vektorového priestoru  $F^n$ . Túto bázu nazývame *štandardná báza  $F^n$* .

Overme, že táto množina vektorov spĺňa podmienky z definície 4.4.2.

Ak  $c_1(1, 0, \dots, 0) + c_2(0, 1, \dots, 0) + \dots + c_n(0, \dots, 0, 1) = (c_1, c_2, \dots, c_n) = (0, 0, \dots, 0)$ , tak platí  $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$ , teda vektory  $\vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \dots, \vec{\varepsilon}_n$  sú naozaj lineárne nezávislé.

Ak máme ľubovoľný vektor  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in F^n$ , dá sa získať ako lineárna kombinácia  $(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1(1, 0, \dots, 0) + x_2(0, 1, \dots, 0) + \dots + x_n(0, \dots, 0, 1) = x_1\vec{\varepsilon}_1 + x_2\vec{\varepsilon}_2 + \dots + x_n\vec{\varepsilon}_n$ . Teda vektory  $\vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \dots, \vec{\varepsilon}_n$  skutočne generujú celý priestor  $F^n$ .

Veľmi podobným postupom ako sme použili v tomto príklade by sme vedeli zdôvodniť, že  $F^M$  je nekonečnorozmerný priestor pre ľubovoľné pole  $F$  a *nekonečnú* množinu  $M$ .

Ako neskôr ukážeme, všetky konečnorozmerné vektorové priestory nad poľom  $F$  sú v istom zmysle podobné ako priestory  $F^n$ .

**Veta 4.4.5.** *Ľubovoľné dve bázy konečnorozmerného vektorového priestoru  $V$  majú rovnaký počet prvkov.*

*Dôkaz.* Nech  $\{\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n\}$  a  $\{\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s\}$  sú dve bázy toho istého vektorového priestoru  $V$ . Pretože  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  a vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  sú lineárne nezávislé, podľa Steinitzovej vety o výmene platí

$$s \leq n.$$

Analogicky môžeme dokázať opačnú nerovnosť  $n \leq s$ . Tieto dve nerovnosti spolu dávajú rovnosť  $n = s$ .  $\square$

**Veta 4.4.6.** *Nech  $V$  je konečnorozmerný vektorový priestor. Ak  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s \in V$  sú lineárne nezávislé, tak sa dajú doplniť na bázu priestoru  $V$ .*

*Dôkaz.* Ak  $V$  je konečnorozmerný, tak podľa definície existujú vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  také, že  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ . Na základe Steinitzovej vety môžeme vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  doplniť niektorými z týchto vektorov tak, aby generovali celý priestor. Nech  $k$  je najmenší možný počet vektorov, ktorými ich môžeme takto doplniť. (Steinitzova veta hovorí, že sa to určite dá  $n - s$  vektormi, nevylučuje však, že niekedy môže stačiť aj menší počet.) Bez ujmy na všeobecnosti, nech  $V = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k]$ .

Chceme dokázať, že vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  tvoria bázu priestoru  $V$ . Pretože sme ich vybrali tak, že generujú celý priestor, zostáva nám dokázať, že sú lineárne nezávislé.



Postupujme sporom – predpokladajme, že by boli lineárne závislé. Potom je niektorý z nich lineárnou kombináciou predchádzajúcich vektorov. Bez ujmy na všeobecnosti, nech je to  $\vec{\alpha}_k$ . (Nemôže to byť žiadny z vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$ , pretože tieto vektory sú lineárne nezávislé.) Potom ale platí

$$V = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k] = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{k-1}],$$

čo je v spore s tým, že  $k$  je najmenší možný počet vektorov, ktorými sa vektory  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_s$  dajú doplniť tak, aby generovali celý priestor  $V$ .  $\square$

**Dôsledok 4.4.7.** Každý konečnorozmerný vektorový priestor  $V \neq \{\vec{0}\}$  má bázu.

**Poznámka 4.4.8.** Ak sme nejaký pojem definovali, vôbec to nemusí znamenať, že taký objekt aj naozaj existuje. Preto je predchádzajúci dôsledok dôležitý. (Hoci táto poznámka znie nesmierne naivne, skutočne sa možno často stretnúť s chybami takéhoto typu.)

**Definícia 4.4.9.** Dimenziou konečnorozmerného vektorového priestoru  $V$  nazývame počet prvkov ľubovolnej jeho bázy. (Pre nulový priestor dodefínujeme  $d(\{\vec{0}\}) = 0$ .) Toto číslo označujeme  $d(V)$ .

**Poznámka 4.4.10.** Aby mala predchádzajúca definícia zmysel, museli sme najprv dokázať, že v konečnorozmernom vektorovom priestore existuje báza a že ľubovoľné dve bázy musia mať rovnaký počet prvkov; teda naša definícia nezávisí od voľby bázy.

S podobnou situáciou – že sa nejaký objekt zdefínuje, ale bude potrebné overiť správnosť definície – sa v matematike stretnete ešte veľa krát.

**Príklad 4.4.11.** Pretože vektory  $\vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \dots, \vec{\varepsilon}_n$  tvoria bázu vektorového priestoru  $F^n$ , platí  $d(F^n) = n$ .

**Dôsledok 4.4.12.** Ak  $V$  je konečnorozmerný vektorový priestor a  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé vo  $V$ , tak  $n \leq d(V)$ .

**Príklad 4.4.13.** Vektory  $(1, 2, 3), (2, 3, 4), (3, 4, 5), (4, 5, 6)$  sú lineárne závislé v  $\mathbb{R}^3$ .

Pretože vieme, že  $d(\mathbb{R}^3) = 3$ , nemôžu byť podľa predchádzajúcej vety v tomto priestore viac ako 3 lineárne nezávislé vektory.

Bázu sme definovali pomocou dvoch podmienok. Nasledujúca, veľmi užitočná veta hovorí, že ak už vieme, že nejaká množina vektorov má „správny“ počet prvkov, môžeme jednu z týchto podmienok vynechať.

**Veta 4.4.14.** Nech  $V$  je konečnorozmerný vektorový priestor a  $d(V) = n$ . Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:

- (i)  $\{\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n\}$  je báza priestoru  $V$ ,
- (ii) vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé,
- (iii)  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ .

*Dôkaz.* Implikácie (i)  $\Rightarrow$  (ii), (i)  $\Rightarrow$  (iii) vyplývajú priamo z definície.

(ii)  $\Rightarrow$  (i): Ak máme  $n$  lineárne nezávislých vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ , podľa Steinitzovej vety ich môžeme doplniť  $n - n = 0$  vektormi na množinu generujúcu celý priestor  $V$ . Teda nemusíme pridávať žiadne vektory a už množina  $\{\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n\}$  je báza (generuje  $V$  a je aj lineárne nezávislá).

(iii)  $\Rightarrow$  (i): Sporom. Ak by boli vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  lineárne závislé, dali by sa niektoré z nich vynechať tak, aby stále tieto vektory generovali celý priestor  $V$ . Dostali by sme  $k$  vektorov, ktoré generujú  $V$ , pričom  $k < n$ . Súčasne by priestor  $V$  mal  $n$ -prvkovú bázu, ktorá je tvorená lineárne nezávislými vektormi. Zo Steinitzovej vety potom vyplýva  $n < k$ . Odvodili sme súčasnú platnosť nerovností  $k < n$  a  $n < k$  – spor.  $\square$

**Príklad 4.4.15.** S použitím predchádzajúcej vety by sme mohli overiť, že vektory  $\vec{\epsilon}_1, \dots, \vec{\epsilon}_n$  tvoria bázu priestoru  $F^n$ . Prvý spôsob: Overili by sme, že generujú celý priestor. Druhý spôsob: Sú lineárne nezávislé. (Kým sme nevedeli, že  $d(V) = n$ , potrebovali sme overiť obe tieto vlastnosti.)

**Veta 4.4.16.** *Nech  $V$  je vektorový priestor. Vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  tvoria bázu priestoru  $V$  právetedy, keď každý vektor  $\vec{\beta}$  sa dá jednoznačne vyjadriť ako*

$$\vec{\beta} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n.$$

*Dôkaz.*  $\Rightarrow$  Pretože  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ , každý vektor sa dá vyjadriť ako lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Ešte treba overiť jednoznačnosť takéhoto vyjadrenia. Nech  $\vec{\beta} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n$  sú dve vyjadrenia vektoru  $\vec{\beta}$ . Úpravou tejto rovnosti dostaneme

$$(c_1 - d_1)\vec{\alpha}_1 + \dots + (c_n - d_n)\vec{\alpha}_n = \vec{0}.$$

Z lineárnej nezávislosti vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  vyplýva  $c_i - d_i = 0$ , čiže  $c_i = d_i$  pre  $i = 1, 2, \dots, n$ .

$\Leftarrow$  Pretože každý vektor z  $V$  sa dá vyjadriť pomocou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ , tieto vektory generujú priestor  $V$ , čiže  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ .

Dalej vieme, že  $\vec{0}$  sa dá vyjadriť ako lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  jediným spôsobom. Z rovnosti  $c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0} = 0\cdot\vec{\alpha}_1 + \dots + 0\cdot\vec{\alpha}_n$  teda vyplýva  $c_1 = \dots = c_n = 0$ . Zistili sme, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé.  $\square$

Ešte si ukážeme pár užitočných tvrdení o podpriestoroch konečnorozmerných priestorov.

**Veta 4.4.17.** *Lubovoľný podpriestor  $S$  konečnorozmerného priestoru  $V$  je konečnorozmerný. Navyše,  $d(S) \leq d(V)$ .*

*Dôkaz.* Pretože  $S \subseteq V$  a  $d(V) = n$ , číslo  $n$  udáva horné ohraničenie pre počet lineárne nezávislých vektorov z  $S$ . Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  je najväčší systém lineárne nezávislých vektorov z  $S$ . Platí  $k \leq n$ . Stačí nám dokázať, že  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  tvorí bázu priestoru  $S$ , čiže  $S = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k]$ .

Predpokladajme, že by existoval vektor  $\vec{\alpha} \in S$ , ktorý nepatrí do  $[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k]$ . Teda  $\vec{\alpha}$  sa nedá vyjadriť ako lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$ , čo znamená, že  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k, \vec{\alpha}$  sú lineárne nezávislé. To však je spor s predpokladom, že  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  je najväčší systém lineárne nezávislých vektorov v  $S$ .  $\square$

**Úloha 4.4.1.** Viete povedať, na ktorom mieste predchádzajúceho dôkazu sme využili, že  $V$  je konečnorozmerný?

**Tvrdenie 4.4.18.** *Ak  $S$  je podpriestor konečnorozmerného vektorového priestoru  $V$  a  $d(S) = d(V)$ , tak  $S = V$ .*

*Dôkaz.* Označme  $n := d(S) = d(V)$ . Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  je báza  $S$ . Keďže je to  $n$  vektorov vo  $V$ , ktoré sú lineárne nezávislé, podľa vety 4.4.14 je to súčasne báza  $V$ . Teda  $S = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = V$ .  $\square$

Pozrime sa na konkrétnom príklade na to, aká je báza niektorých jednoduchých podpriestorov priestoru  $\mathbb{R}^4$ .

**Príklad 4.4.19.** Pripomeňme, že v priestore  $V = \mathbb{R}^4$  máme nulový podpriestor  $\{\vec{0}\}$ , o ktorom vieme že  $d(\{\vec{0}\}) = 0$ . Takisto vieme, že  $V$  je podpriestor  $V$  a v tomto prípade  $d(V) = 4$ . Pozrieme sa na nejaké ďalšie, o niečo menej triviálne podpriestory.

Začnime s podpriestorom

$$S_1 = \{(x, y, w, z) \in \mathbb{R}^4; x + y + w + z = 0\}.$$

(Nebudeme overovať, že je to podpriestor – nemalo by byť pre vás ťažké overiť definíciu alebo kritérium vektorového podpriestoru.)

Ak si zvolíme ľubovoľné  $y, w, z \in \mathbb{R}$ , tak aby vektor  $(x, y, w, z)$  patril do  $S_1$ , tak musí platiť  $x = -y - w - z$ . Priamo dosadením do rovnice  $x + y + w + z = 0$  zistíme, že každý vektor tvaru  $(-y - w - z, y, w, z)$  patrí so  $S_1$ . Teda tento podpriestor môžeme inak vyjadriť ako

$$S_1 = \{(-y - w - z, y, w, z); y, w, z \in \mathbb{R}\}.$$

Po úprave máme  $(-y - w - z, y, w, z) = y(-1, 1, 0, 0) + w(-1, 0, 1, 0) + z(-1, 0, 0, 1)$ , z čoho vidíme, že

$$S_1 = [(-1, 1, 0, 0), (-1, 0, 1, 0), (-1, 0, 0, 1)].$$

Je ľahké overiť, že vektory  $(-1, 1, 0, 0)$ ,  $(-1, 0, 1, 0)$ ,  $(-1, 0, 0, 1)$  sú aj lineárne nezávislé, takže tieto tri vektory tvoria bázu podpriestoru  $S_1$ . Dostávame teda, že  $d(S_1) = 3$ .

Podpriestor  $S_1$  sme dostali ako množinu riešení jedinej rovnice  $x + y + w + z = 0$ . Aby sme mali o trošičku komplikovanejší príklad, skúsme pridať ešte jednu rovnicu a pozrieť sa na podpriestor

$$S_2 = \{(x, y, w, z) \in \mathbb{R}^4; x + y + w + z = 0, x - y + w - z = 0\}.$$

Opäť môžeme použiť podobnú úvahu ako pre podpriestor  $S_1$ . Predpokladajme, že máme zvolené  $w, z \in \mathbb{R}$  a pozrime sa na to, či sú jednoznačne určené  $x$  aj  $y$ .

Sčítaním zadaných rovníc dostaneme  $2x + 2w = 0$ , z čoho vyplýva  $x = -w$ . Keď ich odčítame, tak dostaneme  $2y + 2z = 0$ , čo znamená, že  $y = -z$ . Teda všetky vektory z  $S_2$  musia mať tvar  $(-w, -z, w, z) = w(-1, 0, 1, 0) + z(0, -1, 0, 1)$  a každý vektor takéhoto tvaru patrí do  $S_2$ , o čom sa dá ľahko presvedčiť dosadením. Zistili sme, že

$$S_2 = \{(-w, -z, w, z); w, z \in \mathbb{R}\} = [(-1, 0, 1, 0), (0, -1, 0, 1)].$$

Vektory  $(-1, 0, 1, 0)$  a  $(0, -1, 0, 1)$  sú lineárne nezávislé, teda sme našli dvojprvkú bázu pre  $S_2$ . Znamená to, že  $d(S_2) = 2$ .

Skúsme pridať ešte jednu rovnicu.

$$S_3 = \{(x, y, w, z) \in \mathbb{R}^4; x + y + w + z = 0, x - y + w - z = 0, x - y - w + z = 0\}.$$

Z výpočtov, ktoré sme robili pre  $S_2$ , vieme, že ak nejaký vektor vyhovuje prvým dvom rovniciam, tak musí spĺňať  $x = -w$  a  $y = -z$ . Keď dosadíme do tretej rovnice, dostaneme

$$x - y - w + z = -w + z - w + z = -2w + 2z = 0.$$

Z tejto rovnice vyplýva, že  $w = z$ . Teda akýkoľvek vektor z  $S_3$  musí mať tvar  $(-z, -z, z, z)$ . Dosadením sa presvedčíme, že takéto vektory vyhovujú zadaným rovniciam, a teda

$$S_3 = \{(-z, -z, z, z); z \in \mathbb{R}\} = [(-1, -1, 1, 1)].$$

Vidíme, že  $d(S_3) = 1$ .

Opäť pridajme ešte jednu rovnicu, napríklad sa skúsme pozrieť na podpriestor

$$S_4 = \{(x, y, w, z) \in \mathbb{R}^4; x+y+w+z=0, x-y+w-z=0, x-y-w+z=0, x+y+w-z=0\}.$$

Ak dosadíme do poslednej rovnice  $x = -z$ ,  $y = -z$ ,  $w = z$  (už vieme, že tieto rovnosti spĺňajú riešenia prvých troch rovníc), tak dostaneme

$$x + y + w - z = -z - z + z - z = -2z = 0,$$

z čoho vyplýva, že  $z = 0$ . Preto

$$S_4 = \{(0, 0, 0, 0)\}$$

a  $d(S_4) = 0$ .

Neskôr, v časti 5.7, sa naučíme ako efektívnejšie a jednoduchšie rátať bázu a dimenziu podpriestorov podobných ako v predošlej úlohe.

**Poznámka 4.4.20.** Na predošlej úlohe si môžeme všimnúť istú zákonitosť. Začali sme s priestorom dimenzie 4 a po pridaní novej rovnice dimenzia vždy klesla o jedna. To nemusí platiť vždy – dôležité je, že sme pridávali rovnicu, ktorá nevyplýva z predošlých rovníc (nebola ich lineárnou kombináciou.)

Niečo podobné si vieme geometricky predstaviť v  $\mathbb{R}^3$ . Jedna rovnica nám určí rovinu, teda podpriestor dimenzie 2. (Budeme teraz uvažovať len lineárne rovnice s nulovou pravou stranou, teda vždy dostaneme rovinu prechádzajúcu nulou.) Ak pridáme ďalšiu rovnicu, dostaneme ďalšiu rovinu. Ak je to iná rovina ako tá, čo vyšla z prvej rovnice, tak ako prienik dostaneme priamku – podpriestor dimenzie 1. Ak túto priamku pretne s ďalšou rovinou, tak by sme mali dostať jediný bod – podpriestor dimenzie 0. Nestalo by sa to iba v prípade, že nová rovina by prechádzala touto priamkou. To by zodpovedalo lineárnej závislosti rovníc, s ktorými pracujeme.

Takisto si to môžete rozmyslieť v rovine, kde takýmto rovnicami zodpovedajú priamky.

Keď sa budeme zaoberať riešeniami sústav lineárnych rovníc, tak túto geometrickú predstavu budeme vedieť presnejšie vyjadriť a aj dokázať – vlastne to vyjadruje dôsledok 5.7.5.

Ukážme si ešte jeden príklad, kde by sme na prvý pohľad neočakávali, že nám vedomosti o dimenzii vektorových priestorov môžu pomôcť.

**Príklad 4.4.21.** Pokúsme sa ukázať, že

$$F = \{a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2}; a, b, c \in \mathbb{Q}\}$$

je pole.

Úlohy podobného typu sme riešili v úlohe 3.3.2. Veľa vlastností sa ukáže veľmi jednoducho (mnohé sa priamo zdedia z poľa reálnych čísel.) Jediná vlastnosť, ktorej dôkaz nie je úplne jednoduchý, je existencia inverzného prvku pre každé  $\alpha \in F \setminus \{0\}$ . Takže sa podme pozrieť na túto vlastnosť.

Skúsme si ale ešte predtým uvedomiť to, že  $F$  je vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{Q}$ . (To sa overí veľmi ľahko – na základe podobných argumentov ako v úlohe 4.1.10.) Navyše tiež ľahko vidieť, že tento vektorový priestor je vygenerovaný prvkami 1,  $\sqrt[3]{2}$  a  $\sqrt[3]{2^2}$ , teda má dimenziu najviac 3.

Nech teda  $\alpha = a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2}$ ,  $\alpha \neq 0$ . Čísla 1,  $\alpha$ ,  $\alpha^2$ ,  $\alpha^3$  všetky patria do  $F$ . Sú to teda 4 vektory vo vektorovom priestore dimenzie najviac 3, musia teda byť lineárne závislé. Z toho dostávame, že existujú racionálne čísla  $a, b, c, d \in \mathbb{Q}$ , ktoré nie sú všetky nulové a platí pre ne

$$a + b\alpha + c\alpha^2 + d\alpha^3 = 0.$$

Ak  $a \neq 0$ , tak túto rovnosť môžeme upraviť na tvar

$$-\alpha \left( \frac{b}{a} + \frac{c}{a}\alpha^2 + \frac{d}{a}\alpha^3 \right) = 1,$$

čím je dokázané, že pre  $\alpha$  existuje inverzný prvok.

Ak by platilo  $a = 0$ , tak máme rovnosť  $\alpha(b + c\alpha + d\alpha^2) = 0$ , z ktorej na základe nenulovosti prvku  $\alpha$  dostaneme

$$b + c\alpha + d\alpha^2 = 0.$$

Opäť, ak  $b \neq 0$ , vieme dostať inverzný prvok podobným spôsobom ako v predošlom prípade. Ak  $b = 0$ , tak dostaneme  $c\alpha + d = 0$ .

Teraz už dostávame buď  $\alpha = \frac{d}{c}$ , čo znamená, že  $\alpha$  je racionálne a má inverzný prvok. Alebo dostaneme  $a = b = c = d = 0$ , lenže o týchto číslach sme predpokladali, že aspoň jedno z nich je nenulové.

Môžete vyskúšať, či by ste vedeli priamo vypočítať inverzný prvok k danému prvku poľa  $F$ . Zistíte, že je to pomerne zdĺhavý výpočet. V príklade 6.5.6 si ukážeme, ako sa tento výpočet dá o niečo urýchliť. V budúcom semestri na predmete Algebra 2 sa budeme učiť aj o konečných rozšíreniach polí. V súvislosti s touto témou budú často užitočné úvahy takého typu, ako sme robili v tomto príklade.

V tejto časti sme sa zaoberali iba konečnorozmernými vektorovými priestormi. (A takisto aj v nasledujúcich častiach nájdete veľa výsledkov, ktoré dokážeme iba pre konečnorozmerné vektorové priestory.) Azda by bolo užitočné vidieť aj príklad vektorového priestoru, ktorý nie je konečnorozmerný.

**Príklad 4.4.22.** Vektorový priestor  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  všetkých zobrazení z  $\mathbb{R}$  do  $\mathbb{R}$  (príklad 4.1.4) nie je konečnorozmerný.

Predpokladajme, že by bol konečnorozmerný. Potom by existoval konečný počet funkcií  $g_1, \dots, g_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  tak, že  $[g_1, \dots, g_n] = \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ . Ak sa nám podarí zostrojiť  $n + 1$  funkcií, ktoré sú v  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  lineárne nezávislé, tak pomocou Steinitzovej vety ľahko dostaneme spor ( $n + 1 \leq n$ ).

Pokúsme sa teda definovať takéto funkcie. Pre  $k = 0, 1, \dots, n$  definujme zobrazenie  $f_k: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  ako

$$f_k(x) = \begin{cases} 1, & \text{ak } x = k \\ 0, & \text{ak } x \neq k \end{cases}$$

Tvrďme, že  $f_0, \dots, f_n$  sú lineárne nezávislé. Skutočne, ak platí rovnosť  $c_0f_0 + c_1f_1 + \dots + c_nf_n = 0$  (kde 0 označuje nulovú funkciu), tak pre každé  $x \in \mathbb{R}$  máme

$$c_0f_0(x) + c_1f_1(x) + \dots + c_nf_n(x) = 0.$$

Špeciálne, musí to platiť aj keď za  $x$  dosadíme  $k = 0, 1, \dots, n$ . V takom prípade však dostávame  $f_k(k) = 1$  a  $f_j(k) = 0$ , teda z predchádzajúcej rovnosti priamo dostávame

$$c_k = 0.$$

**Poznámka 4.4.23.** Možno vám napadla otázka, či sa dá definovať báza aj pre nekonečnorozmerné vektorové priestory. Dá sa to, v tomto prípade sa zvykne nazývať *Hamelova báza*. Na jej zavedenie by sme však potrebovali podstatne väčšie vedomosti z teórie množín. Dokonca platí aj analógia vety 4.4.5, čiže aj ľubovoľné 2 Hamelove bázy majú rovnaký „počet“ prvkov – s tým rozdielom, že pre nekonečné množiny najprv treba definovať nový pojem, ktorý by zodpovedal počtu prvkov konečných množín (nazýva sa kardinalita množiny, viac

sa o nej dozvieme na iných predmetoch). Pre prípad, že by vás to zaujímalo a chceli by ste sa k tomuto problému časom vrátiť uvediem aj niekoľko odkazov na literatúru. V [NS] je pekným spôsobom dokázané, že ľubovoľné dve Hamelove bázy toho istého priestoru musí mať rovnakú „veľkosť“ (kardinalitu). V [ŠS, Kapitola 10.3] autori definujú Hamelovu bázu v špeciálnom prípade – pre reálne čísla ako vektorový priestor nad poľom  $\mathbb{Q}$  (úloha\* 4.3.9). Niečo o Hamelovej báze (a aj nejakých jej aplikáciách) si môžete prečítať aj v [Sle1].

Ešte raz zdôrazňujem, že túto poznámku som sem vložil len kvôli tomu, aby ste vedeli, kde môžete hľadať v prípade, že by ste sa k takémuto niečomu chceli neskôr vrátiť. (Zatiaľ by to pre vás bolo pomerne ťažké, potrebujete na to najprv poznať základné fakty o kardinalite množín a na dôkaz existencie bázy aj niečo o Zornovej leme.)

### Cvičenia

**Úloha 4.4.2.** Zistite, či dané vektory tvoria bázu v  $\mathbb{R}^3$ :

- a)  $(1,2,3), (1,-2,3), (1,2,-3)$
- b)  $(1,1,1), (1,1,0), (1,0,1)$
- c)  $(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (1,1,1)$ .

**Úloha 4.4.3.** Zistite, či dané vektory tvoria bázu v  $\mathbb{Z}_5^3$ :

- a)  $(1,2,3), (2,3,4), (0,3,1)$
- b)  $(1,0,0), (0,1,2), (2,1,3)$
- c)  $(0,1,2), (3,0,1), (1,0,2)$ .

**Úloha 4.4.4.**  $P_n$  označme priestor všetkých polynómov stupňa najviac  $n$ . Overte, že  $d(P_n) = n + 1$  a že  $1, x - 1, \dots, (x - 1)^n$  je báza tohoto priestoru.

**Úloha 4.4.5.** Určte dimenziu podpriestoru  $[\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}]$ , ak  $\vec{\alpha} = (1, 3, 2, 1)$ ,  $\vec{\beta} = (4, 9, 5, 4)$  a  $\vec{\gamma} = (3, 7, 4, 3)$  v  $\mathbb{R}^4$ .

**Úloha 4.4.6.** Ak sa to dá, doplňte dané vektory na bázu príslušného vektorového priestoru:

- a)  $(1,1,2), (2,1,3)$  v  $\mathbb{R}^3$ ,
- b)  $x^2 - 1, x^2 + 1$  v priestore polynómov stupňa najviac 3,
- c)  $(1,2,3,0), (3,4,1,2)$  v  $\mathbb{Z}_5^4$ .

**Úloha 4.4.7.** Máme dané vektory  $\vec{\alpha}_1 = (1, 1, 2, 0)$ ,  $\vec{\alpha}_2 = (0, 0, 3, 1)$  v priestore  $\mathbb{Z}_5^4$ . Koľko existuje možností na výber vektorov  $\vec{\alpha}_3, \vec{\alpha}_4 \in \mathbb{Z}_5^4$  tak, aby tieto štyri vektory tvorili bázu?

**Úloha 4.4.8.** Ak každý z vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_k$  je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m$ , tak  $d([\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_k]) \leq d([\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m])$ .

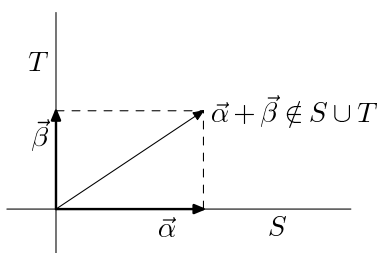
**Úloha 4.4.9.** Overte, že množina  $S = \{f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : (\exists a, b \in \mathbb{R})(\forall x \in \mathbb{R})f(x) = ax + b\}$  je podpriestor priestoru všetkých funkcií z  $\mathbb{R}$  do  $\mathbb{R}$ . Nájdite funkcie  $g, h \in S$  také, že  $S = [g, h]$ .

**Úloha 4.4.10.** Zistite, či  $S = \{f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}; f(x) = ax^2 + bx + c, a, b, c \in \mathbb{R}\}$  je vektorový podpriestor priestoru reálnych funkcií. Ak áno, nájdite,  $g_1, g_2, g_3 \in S$  také, že  $S = [g_1, g_2, g_3]$ .

**Úloha 4.4.11.** Nájdite bázu pre každý vektorový podpriestor z úlohy 4.2.3.

## 4.5 Lineárne a direktné súčty podpriestorov

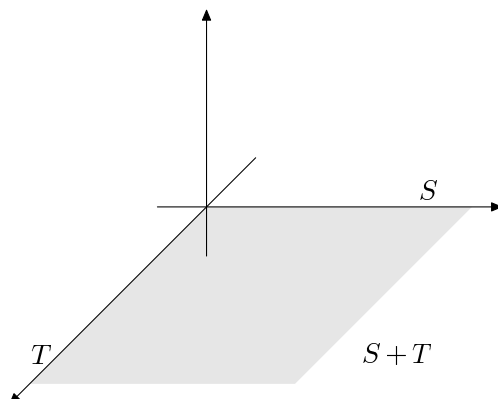
Už vieme, že prienik podpriestorov vektorového priestoru je tiež podpriestor (vety 4.2.8 a 4.2.10). Ako je to so zjednotením? Ak si zvolíme podpriestory  $S = [(1, 0, 0)]$  a  $T = [(0, 1, 0)]$



Obr. 4.4: Zjednotenie 2 podpriestorov nemusí byť podpriestor

priestoru  $R^3$ , tak vidíme, že  $S \cup T$  nie je vektorový podpriestor, lebo  $(1, 0, 0) \in S \cup T$ ,  $(0, 1, 0) \in S \cup T$ , ale  $(1, 0, 0) + (0, 1, 0) = (1, 1, 0) \notin S \cup T$ .

Zaujímalo by nás, ako vyzerá najmenší podpriestor, ktorý obsahuje  $S$  aj  $T$ . Z obrázku 4.5 môžeme zistiť, že v tomto prípade je to podpriestor  $[(1, 0, 0), (0, 1, 0)]$ .

Obr. 4.5: Najmenší podpriestor obsahujúci  $S$  aj  $T$ 

Ukážeme si, ako možno nájsť takýto podpriestor vo všeobecnosti, pre ľubovoľné dva podpriestory daného vektorového priestoru  $V$ .

**Veta 4.5.1.** *Nech  $S, T$  sú vektorové podpriestory vektorového priestoru  $V$  nad polom  $F$ . Potom*

$$S + T = \{\vec{\alpha} + \vec{\beta}; \vec{\alpha} \in S, \vec{\beta} \in T\}$$

*je podpriestorom vektorového priestoru  $V$ .*

Táto veta vlastne hovorí, že množina všetkých vektorov, ktoré sa dajú získať ako súčty vektorov z  $S$  a z  $T$ , tvorí vektorový podpriestor. Všimnite si, že v predchádzajúcom príklade bolo  $S + T = [(1, 0, 0), (0, 1, 0)]$ .

*Dôkaz.* Overíme podmienky z definície vektorového podpriestoru. Množina  $S + T$  je neprázdna, lebo  $\vec{0} \in S$ ,  $\vec{0} \in T$ , čiže  $\vec{0} = \vec{0} + \vec{0} \in S + T$ .

$S + T$  je uzavretá na súčty: Ak  $\vec{\gamma}_1, \vec{\gamma}_2 \in S + T$ , tak vektory  $\vec{\gamma}_1, \vec{\gamma}_2$  sa dajú napísať v tvare  $\vec{\gamma}_1 = \vec{\alpha}_1 + \vec{\beta}_1$ ,  $\vec{\gamma}_2 = \vec{\alpha}_2 + \vec{\beta}_2$ , kde  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2 \in S$  a  $\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2 \in T$ . Potom  $\vec{\gamma}_1 + \vec{\gamma}_2 = (\vec{\alpha}_1 + \vec{\beta}_1) + (\vec{\alpha}_2 + \vec{\beta}_2) = (\vec{\alpha}_1 + \vec{\alpha}_2) + (\vec{\beta}_1 + \vec{\beta}_2)$ . (Využili sme komutatívnosť a asociatívnosť sčítovania.) Pretože  $S$  je

vektorový podpriestor vektor  $\vec{\alpha}_1 + \vec{\alpha}_2$  patrí do  $S$ , podobne  $\vec{\beta}_1 + \vec{\beta}_2 \in T$ . Ukázali sme, že vektor  $\vec{\gamma}_1 + \vec{\gamma}_2$  sa dá napísať ako súčet vektora z  $S$  a vektora z  $T$ , teda  $\vec{\gamma}_1 + \vec{\gamma}_2 \in S + T$ .

$S + T$  je uzavretá na násobenie skalárom: Ak  $\vec{\gamma} \in S + T$ , tak  $\vec{\gamma} = \vec{\alpha} + \vec{\beta}$  pre nejaké  $\vec{\alpha} \in S$  a  $\vec{\beta} \in T$ . Nech  $c \in F$  je ľubovoľný skalár. Potom  $c\vec{\gamma} = c\vec{\alpha} + c\vec{\beta}$ . Pritom  $c\vec{\alpha} \in S$ ,  $c\vec{\beta} \in T$ , čiže  $c\vec{\gamma} \in S + T$ .  $\square$

**Definícia 4.5.2.** Ak  $S, T$  sú podpriestory vektorového podpriestoru  $V$ , tak vektorový podpriestor  $S + T$  sa nazýva *lineárny súčet* podpriestorov  $S$  a  $T$ .

Vidno, že  $S$  aj  $T$  sú podmnožiny  $S + T$ , čiže  $S + T$  obsahuje oba podpriestory  $S$  aj  $T$ . ( $\vec{\alpha} \in S \Rightarrow \vec{\alpha} = \vec{\alpha} + \vec{0} \in S + T$ , podobne pre  $T$ .) Priestor  $S + T$  je skutočne najmenší vektorový podpriestor priestoru  $V$ , ktorý obsahuje  $S$  aj  $T$ . Ak totiž  $S, T \subseteq U$  a  $U$  je vektorový podpriestor  $V$ , tak  $U$  musí obsahovať všetky súčty tvaru  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}$ , pretože  $\vec{\alpha} \in S \subseteq S + T$  a  $\vec{\beta} \in T \subseteq S + T$ .

**Veta 4.5.3.** Nech  $S$  a  $T$  sú podpriestory vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $F$ . Nech  $S = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ ,  $T = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ . Potom  $S + T = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ .

*Dôkaz.* Je zrejmé, že vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m$  patria do  $S + T$ . Keďže  $S + T$  je vektorový podpriestor, musí potom platiť  $[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m] \subseteq S + T$ .

Ešte treba dokázať opačnú inklúziu, čiže chceme ukázať, že

$$\vec{\gamma} \in S + T \Rightarrow \vec{\gamma} \in [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m].$$

Ak  $\vec{\gamma} \in S + T$ , tak  $\vec{\gamma} = \vec{\alpha} + \vec{\beta}$ , kde  $\vec{\alpha} \in [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  a  $\vec{\beta} \in [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ . To znamená, že existujú  $c_1, \dots, c_n, d_1, \dots, d_m \in F$  tak, že  $\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$  a  $\vec{\beta} = d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_m\vec{\beta}_m$ . Potom  $\vec{\gamma} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n + d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_m\vec{\beta}_m$ , čiže  $\vec{\gamma} \in [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ .  $\square$

**Veta 4.5.4.** Nech  $S, T$  sú podpriestory konečnorozmerného priestoru  $V$ . Potom<sup>5</sup>

$$d(S) + d(T) = d(S + T) + d(S \cap T).$$

*Dôkaz.* Podľa vety 4.4.17 každý podpriestor konečnorozmerného priestoru je tiež konečnorozmerný, teda všetky dimenzie, ktoré vystupujú vo vete, sú skutočne definované.

V prípade, že  $S \subseteq T$  máme  $S + T = T$  a  $S \cap T = S$ , z čoho je zrejmé, že tvrdenie vety platí. Prípád  $T \subseteq S$  je symetrický.

Zostáva teda prípad, že  $S \not\subseteq T$  a  $T \not\subseteq S$ . Môžeme potom predpokladať, že  $S \cap T$  má bázu  $\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r$ . (V prípade, že  $S \cap T = \{\vec{0}\}$ , tak tento podpriestor nemá bázu – vtedy stačí zobrať  $r = 0$  a vo zvyšku dôkazu môžeme postupovať úplne rovnako.) Tieto vektory patria do priestoru  $S$  a sú lineárne nezávislé, preto ich možno doplniť na bázu priestoru  $S$ , čiže  $S = [\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_s]$ . Podobne môžeme v  $T$  zvoliť bázu  $\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_t$ . Podľa vety 4.5.3 dostaneme

$$S + T = [\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_s, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_t].$$

Stačí, ak dokážeme, že tieto vektory sú lineárne nezávislé, lebo potom tvoria bázu v  $S + T$  a máme  $d(S + T) + d(S \cap T) = r + s + t + r = (r + s) + (r + t) = d(S) + d(T)$ .

Nech  $c_1\vec{\gamma}_1 + \dots + c_r\vec{\gamma}_r + d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_s\vec{\alpha}_s + e_1\vec{\beta}_1 + \dots + e_t\vec{\beta}_t = \vec{0}$ . Potom  $\vec{\delta} = c_1\vec{\gamma}_1 + \dots + c_r\vec{\gamma}_r + d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_s\vec{\alpha}_s = -e_1\vec{\beta}_1 + \dots - e_t\vec{\beta}_t$  patrí do podpriestoru  $S \cap T$ . (Patrí do  $S$ , lebo je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r, \vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_s$ . Do  $T$  patrí preto, že je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_t$ .) Teda  $\vec{\delta} = c'_1\vec{\gamma}_1 + \dots + c'_r\vec{\gamma}_r$ . Vďaka tomu, že

<sup>5</sup>Tento vzorec pripomína vzorec pre počet prvkov zjednotenia dvoch množín  $|S \cup T| = |S| + |T| - |S \cap T|$ .



vyjadrenie vektora pomocou prvkov bázy je jednoznačné, dostaneme, že  $d_1 = \dots = d_s = 0$  a  $e_1 = \dots = e_t = 0$ . Potom máme  $c_1\vec{\gamma}_1 + \dots + c_r\vec{\gamma}_r = \vec{0}$  a (pretože  $\vec{\gamma}_1, \dots, \vec{\gamma}_r$  je báza)  $c_1 = \dots = c_r = 0$ .  $\square$

**Definícia 4.5.5.** Nech  $S, T$  sú podpriestory vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $F$  a nech  $S \cap T = \{\vec{0}\}$ . Potom podpriestor  $S + T$  nazývame *direktný (priamy) súčet* podpriestorov  $S$  a  $T$  a označujeme ho  $S \oplus T$ .

**Veta 4.5.6.** Nech  $S, T, P$  sú podpriestory konečnorozmerného vektorového priestoru  $V$  nad poľom  $F$ . Tieto podmienky sú potom ekvivalentné:

- (i)  $P = S \oplus T$
- (ii)  $P = S + T$  a  $d(P) = d(S) + d(T)$
- (iii) Ak  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  je báza podpriestoru  $S$  a  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m$  je báza podpriestoru  $T$ , tak  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m$  je báza podpriestoru  $P$ .
- (iv)  $P = S + T$  a každý vektor  $\vec{\gamma} \in P$  sa dá jediným spôsobom vyjadriť v tvare  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}$ , kde  $\vec{\alpha} \in S$  a  $\vec{\beta} \in T$ . (T.j. ak  $\vec{\gamma} = \vec{\alpha}_1 + \vec{\beta}_1 = \vec{\alpha}_2 + \vec{\beta}_2$ , pričom  $\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2 \in S$  a  $\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2 \in T$ , tak  $\vec{\alpha}_1 = \vec{\alpha}_2$  a  $\vec{\beta}_1 = \vec{\beta}_2$ .)

*Dôkaz.* (i)  $\Rightarrow$  (ii) Podľa vety 4.5.4 dostaneme  $d(S) + d(T) = d(S + T) + d(S \cap T) = d(P) + d(\{\vec{0}\}) = d(P)$ .

(ii)  $\Rightarrow$  (iii) Podľa vety 4.5.3 je  $S + T = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ . Pretože  $d(P) = n + m$  a našli sme  $n + m$  vektorov, ktoré sú ho generujú, musia byť tieto vektory lineárne nezávislé a tvoria bázu.

(iii)  $\Rightarrow$  (iv) Z vety 4.5.3 vyplýva, že  $S + T = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m]$ , teda  $P = S + T$ . Nech  $\vec{\gamma} = \vec{\alpha} + \vec{\beta} = \vec{\alpha}' + \vec{\beta}'$ . Potom  $\vec{\alpha} - \vec{\alpha}' + \vec{\beta} - \vec{\beta}' = \vec{0}$ . Ak vyjadríme vektory  $\vec{\alpha} - \vec{\alpha}' \in S$  a  $\vec{\beta} - \vec{\beta}' \in T$  pomocou báz týchto podpriestorov, čiže  $\vec{\alpha} - \vec{\alpha}' = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$  a  $\vec{\beta} - \vec{\beta}' = d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_m\vec{\beta}_m$  dostaneme

$$c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n + d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_m\vec{\beta}_m = \vec{0}.$$

Pretože vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_m$  tvoria bázu v  $P$ , sú lineárne nezávislé a  $c_1 = \dots = c_n = d_1 = \dots = d_m = 0$ . Z toho vyplýva, že  $\vec{\alpha} - \vec{\alpha}' = \vec{0}$  a  $\vec{\beta} - \vec{\beta}' = \vec{0}$ , čiže  $\vec{\alpha} = \vec{\alpha}'$  a  $\vec{\beta} = \vec{\beta}'$ .

(iv)  $\Rightarrow$  (i) Potrebujeme ukázať iba že  $S \cap T = \{\vec{0}\}$ . Ak  $\vec{\gamma} \in S \cap T$ , tak  $\vec{\gamma}$  môžeme vyjadriť ako súčet vektora z  $S$  a vektora z  $T$  týmito dvoma spôsobmi:  $\vec{\gamma} = \vec{\gamma} + \vec{0} = \vec{0} + \vec{\gamma}$ . Z jednoznačnosti potom vyplýva, že  $\vec{\gamma} = \vec{0}$ .  $\square$

## Cvičenia

**Úloha 4.5.1.** Zistite<sup>6</sup>  $d(U)$ ,  $d(V)$ ,  $d(U + V)$ ,  $d(U \cap V)$ , bázu  $U + V$  a bázu  $U \cap V$

- a) v  $\mathbb{R}^2$  pre  $U = [(2, 5)]$ ,  $V = [(1, 3)]$
  - b) v  $\mathbb{R}^3$  pre  $U = [(1, 2, 3), (-1, 2, 3)]$ ,  $V = [(2, 1, 4), (-2, 1, 4)]$
  - c) v  $\mathbb{R}^4$  pre  $U = [(1, 0, 1, 0), (1, 0, 0, 1)]$ ,  $V = [(1, 1, 1, 0), (1, 0, 1, 1)]$
  - d) v  $\mathbb{R}^4$  pre  $U = [(1, 2, 3, 4), (1, 1, 1, 1), (4, 3, 2, 1)]$ ,  $V = [(1, 1, 0, 0), (0, 0, 1, 1), (1, 0, 0, 0)]$ .
- [a)1,1,2,0; b)2,2,3,1; c)2,2,4,0; d)2,3,4,1]

**Úloha 4.5.2.** Nech  $T = [(1, 3, 2), (2, 1, 3), (3, 4, 0)]$  je podpriestor  $(\mathbb{Z}_5)^3$ . Existuje podpriestor  $S$  taký, že  $(\mathbb{Z}_5)^3 = T \oplus S$ ? Ak áno, nájdite ho! Je tento podpriestor jednoznačne určený?

<sup>6</sup>Túto úlohu budeme riešiť neskôr, keď sa (v časti 5.2) naučíme jednoduchý spôsob ako nájsť dimenziu a bázu daného podpriestoru  $\mathbb{R}^n$ . Zaradil som ju však sem, pretože súvisí s témou tejto podkapitoly.

**Úloha 4.5.3.** Nech  $S \neq T$  sú dva podpriestory vektorového priestoru  $F^3$  nad polom  $F$  a  $d(S) = 2$ ,  $d(T) = 2$ . Dokážte, že  $d(S \cap T) \geq 1$ .

**Úloha 4.5.4.** Ak máme zadané podpriestory

$$W_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; x + y - z = 0\},$$

$$W_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; 3x + y - 2z = 0\},$$

$$W_3 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3; x - 7y + 3z = 0\},$$

nájdite  $\dim(W_1 \cap W_2 \cap W_3)$  a  $\dim(W_1 + W_2)$ ,  $\dim(W_1 + W_3)$ ,  $\dim(W_2 + W_3)$ .

**Úloha 4.5.5\*.** Nech  $S_1, \dots, S_n$  a  $P$  sú podpriestory vektorového priestoru  $V$ . Ukážte, že nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:

- (i)  $P = S_1 + \dots + S_n$  a pre každé  $i = 1, \dots, n$  platí  $S_i \cap (S_1 + \dots + S_{i-1} + S_{i+1} + \dots + S_n) = \{\vec{0}\}$ ;
- (ii) Každý vektor  $\vec{\gamma} \in P$  sa dá práve jedným spôsobom vyjadriť v tvare  $\vec{\gamma} = \vec{\alpha}_1 + \dots + \vec{\alpha}_n$ , kde  $\vec{\alpha}_i \in S_i$  pre  $i = 1, \dots, n$ .

Ktorúkoľvek z týchto ekvivalentných podmienok môžeme zobrať za definíciu priameho súčtu  $S_1 \oplus \dots \oplus S_n$ . (Pri definícii lineárneho súčtu  $n$  podpriestorov nijaké komplikácie nenastanú a môžeme ho definovať jednoducho ako  $S_1 + \dots + S_n = \{\vec{\alpha}_1 + \dots + \vec{\alpha}_n; \vec{\alpha}_i \in S_i \text{ pre } i = 1, \dots, n\}$ .)

**Úloha 4.5.6.** Dokážte, že ak  $e_1, \dots, e_k$  je báza vektorového priestoru  $V$ , tak  $V = [e_1] \oplus \dots \oplus [e_k]$ . (Ako definíciu priameho súčtu viacerých podpriestorov môžete brať ktorúkoľvek z ekvivalentných podmienok z úlohy 4.5.5\*.)

# Kapitola 5

## Lineárne zobrazenia a matice

### 5.1 Matice

**Definícia 5.1.1.** *Maticou* typu  $m \times n$  nad poľom  $F$  nazývame ľubovoľnú tabuľku pozostávajúcu z prvkov poľa  $F$ , ktorá má  $m$  riadkov a  $n$  stĺpcov.

Matice zapisujeme v tvare

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

príčom  $a_{ij}$  označuje prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci.

Niekedy bude výhodné použiť stručnejší zápis  $\|a_{ij}\|$ , čím myslíme, že pre stručnosť niekedy len uvedieme predpis pre prvok  $i$ -teho riadku a  $j$ -teho stĺpca.

**Príklad 5.1.2.**  $\begin{pmatrix} 2 & -1 & 3 \\ 4 & -2 & 5 \end{pmatrix}$  je matice typu  $2 \times 3$  nad  $\mathbb{R}$ .

**Definícia 5.1.3.** Nech  $A, B$  sú matice typu  $m \times n$  nad poľom  $F$  a  $c \in F$ .

(a) Súčet matíc  $A = \|a_{ij}\|$  a  $B = \|b_{ij}\|$  je matice  $A + B = \|a_{ij} + b_{ij}\|$ .

(b) Matice  $c \cdot A = \|ca_{ij}\|$  sa nazýva  $c$ -násobok matice  $A$ .

(Teda sčítovanie matíc a násobenie matice skalárom definujeme po súradniciach.)

Všimnime si, že súčet matíc definujeme len pre matice rovnakého typu.

**Príklad 5.1.4.** Uvažujme matice typu  $2 \times 2$  nad  $\mathbb{R}$ .

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$$2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -2 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

**Veta 5.1.5.** *Matice typu  $m \times n$  nad poľom  $F$  s takto definovaným sčítovaním a násobením skalármi tvoria vektorový priestor nad poľom  $F$ .*

*Dôkaz.* Úloha 5.1.1. (Vlastne si stačí uvedomiť, že je to to isté ako priestor  $F^{mn}$  – matice typu  $m \times n$  tvoria len inak zapísané  $mn$ -tice prvkov z  $F$ , operácie sú definované tak, že korešpondujú s priestorom  $F^{mn}$ .)  $\square$

Vďaka tomu, že matice tvoria vektorový priestor nad  $F$  môžeme využívať všetky vlastnosti, ktoré poznáme z vektorových priestorov, ako napríklad identitu  $c(A + B) = cA + cB$ .

Budeme používať označenie  $-A = \|-a_{ij}\|$  pre opačnú maticu k matici  $A$  a  $0 = \|0\|$  pre nulovú maticu.

**Definícia 5.1.6.** Maticu typu  $n \times n$  (teda takú, ktorá má rovnaký počet riadkov a stĺpcov) nazývame *štvorcová matica*.

Maticu

$$I = I_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

typu  $n \times n$ , ktorá má na diagonále jednotky a mimo diagonály nuly, nazývame *jednotkovú maticu*.

Štvorcová matica, ktorá má mimo diagonály iba nuly (t.j.  $a_{ij} = 0$  pre  $i \neq j$ ) sa nazýva *diagonálna matica*. (Príkladom diagonálnej matice je jednotková matica.)

**Poznámka\* 5.1.7.** Jednotkovú maticu by sme mohli definovať ako  $I = \|\delta_{ij}\|$ , kde

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ak } i = j, \\ 0 & \text{ak } i \neq j. \end{cases}$$

Takto definovaný symbol sa v matematike často používa, nazýva sa *Kroneckerov symbol*.

Často budeme používať aj pojem transponovanej matice.

**Definícia 5.1.8.** *Transponovaná matica* k matici  $A$  typu  $m \times n$  je matica  $A^T$  typu  $n \times m$  určená ako

$$A^T = \|a_{ji}\|.$$

Štvorcová matica  $A$  sa nazýva *symetrická*, ak  $A = A^T$  a *antisymetrická*, ak  $A = -A^T$ .

Teda  $A^T$  je vlastne matica  $A$  prevrátená symetricky podľa hlavnej diagonály.

Môžeme si všimnúť, že platí  $I^T = I$ ,  $(A^T)^T = A$ ,  $(A + B)^T = A^T + B^T$  a  $(cA)^T = cA^T$  (úloha 5.1.3).

**Príklad 5.1.9.** Ak  $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 3 \\ 4 & -2 & 5 \end{pmatrix}$ , tak  $A^T = \begin{pmatrix} 2 & 4 \\ -1 & -2 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}$

Matice  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \end{pmatrix}$  a  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  sú symetrické, matice  $\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}$  a  $\begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -2 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$  sú antisymetrické.

## Cvičenia

**Úloha 5.1.1.** Overte, že matice typu  $m \times n$  nad poľom  $F$  (spolu so sčítaním matíc a násobením matice skalárom) tvoria vektorový priestor nad  $F$ .

**Úloha 5.1.2.** Dokážte, že diagonálne matice tvoria podpriestor vektorového priestoru všetkých matíc typu  $n \times n$ .

**Úloha 5.1.3.** Nech matice  $A$  a  $B$  sú rovnakého typu. Dokážte, že potom  $(A+B)^T = A^T + B^T$  a  $(A^T)^T = A$ . Čomu sa rovná  $(c_1A + c_2B)^T$ ?

**Úloha 5.1.4.** Dokážte, že

a) množina všetkých symetrických matíc typu  $n \times n$  a

b) množina všetkých antisymetrických matíc typu  $n \times n$

tvoria podpriestory vektorového priestoru všetkých matíc typu  $n \times n$ . Je vektorový priestor matíc typu  $n \times n$  direktný súčet týchto podpriestorov?

## 5.2 Riadková ekvivalencia a hodnosť matice

**Definícia 5.2.1.** *Podpriestorom prislúchajúcim matici*  $A$  typu  $m \times n$  nad poľom  $F$  nazývame podpriestor priestoru  $F^n$  generovaný riadkami matice  $A$ . Označujeme ho  $V_A$ .

Aby sme rozumeli predchádzajúcej definícii, uvedomme si, že každý riadok matice je vlastne  $n$ -tica prvkov z  $F$ , čiže ho môžeme chápať ako vektor z  $F^n$ .

Ak matica  $A$  má riadky  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m$ , tak podpriestor prislúchajúci tejto matici je vlastne  $V_A = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m]$ .

**Príklad 5.2.2.** Pozrime sa na pár príkladov nad poľom  $\mathbb{R}$ .

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad V_A = [(1, 0, 1), (0, 1, 1)]$$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad V_I = [(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)] = \mathbb{R}^3$$

Vidíme, že jednotkovej matici  $I$  zodpovedá štandardná báza priestoru  $\mathbb{R}^3$ , preto jej prislúcha celý priestor  $\mathbb{R}^3$ .

Zavedieme teraz úpravy, ktoré nám umožnia jednoduchšie popísať priestor prislúchajúci danej matici.

**Definícia 5.2.3.** *Elementárne riadkové operácie* na matici  $A$  nad poľom  $F$  sú:

1. výmena 2 riadkov matice,
2. vynásobenie niektorého riadku matice nenulovým prvkom  $c$  poľa  $F$ ,
3. pripočítanie násobku niektorého riadku k inému riadku.

Hovoríme, že matice  $A$  a  $B$  sú *riadkovo ekvivalentné* ak maticu  $B$  možno z  $A$  dostať pomocou konečnej postupnosti elementárnych riadkových operácií. Ak matice  $A$  a  $B$  sú riadkovo ekvivalentné, zapisujeme to ako  $A \sim B$ .

**Príklad 5.2.4.** Nasledujúce matice sme dostali z prvej pomocou elementárnych riadkových operácií. Sú to teda riadkovo ekvivalentné matice.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 2 & -2 & 1 \\ 3 & -2 & 3 \end{pmatrix} \stackrel{(1)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 0 & -6 & -9 \\ 3 & -2 & 3 \end{pmatrix} \stackrel{(2)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 0 & -6 & -9 \\ 0 & -8 & -12 \end{pmatrix} \stackrel{(3)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 0 & 2 & 3 \\ 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} \stackrel{(4)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \stackrel{(5)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \stackrel{(6)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Elementárne riadkové operácie, ktoré sme použili sú:

- (1) k 2.riadku sme pripočítali (-2)-násobok prvého (inak povedané, odčítali sme dvojnásobok),
- (2) od 3.riadku sme odčítali 3-násobok prvého,
- (3) 2.riadok sme vynásobili  $-\frac{1}{3}$ , 3.riadok sme vynásobili  $-\frac{1}{4}$ ,
- (4) od 2.riadku sme odpočítali tretí,
- (5) od prvého riadku sme odpočítali druhý,
- (6) druhý riadok sme vynásobili  $\frac{1}{2}$  (čiže sme vlastne ho vydělili 2).

**Poznámka 5.2.5.** Podobným spôsobom sa dajú definovať aj elementárne stĺpcové operácie.

**Poznámka 5.2.6.** Je zrejmé, že ak  $A \sim B$  a  $B \sim C$ , tak platí aj  $A \sim C$ . (Postupnosťou elementárnych riadkových operácií vieme z  $A$  dostať najprv  $B$  a potom z  $B$  dostať  $C$ .)

Okrem toho elementárne riadkové operácie možno obrátiť, preto ak  $A \sim B$ , tak platí aj  $B \sim A$ .

(Nie je ťažké si uvedomiť, že ak  $B$  dostaneme s  $A$  výmenou 2 riadkov, tak výmenou tých istých riadkov dostaneme z matice  $B$  pôvodnú maticu  $A$ . Takisto, ak použijeme vynásobenie niektorého riadku prvkom  $c \neq 0$  poľa  $F$ , tak pôvodnú maticu dostaneme tak, že tento riadok vynásobíme  $c^{-1}$ . Ak sme v matici  $B$  získali  $k$ -ty riadok pripočítaním  $c$ -násobku  $j$ -teho riadku,

čiže  $k$ -ty riadok novej matice pomocou riadkov pôvodnej matice vieme vyjadriť ako  $\vec{\alpha}_k + c\vec{\alpha}_j$ , tak  $(\vec{\alpha}_k + c\vec{\alpha}_j) - c\vec{\alpha}_j = \vec{\alpha}_k$ , čiže pripočítaním  $(-c)$ -násobku  $j$ -teho riadku ku  $k$ -temu dostaneme z  $B$  pôvodnú maticu.)

**Veta 5.2.7.** *Elementárne riadkové operácie nemenia podpriestor prislúchajúci danej matici. (Teda riadkovo ekvivalentným maticiam zodpovedá rovnaký podpriestor.)*

*Dôkaz.* Chceme ukázať, že ak na matici  $A$ , ktorej riadky sú  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m$ , urobíme ktorúkoľvek z 3 elementárnych riadkových operácií, podpriestor prislúchajúci novej matici bude rovnaký ako podpriestor  $V_A = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m]$ .

V prípade výmeny 2 riadkov je to jasné – ak vektory napíšeme v inom poradí, tak vygenerujú ten istý podpriestor.

Ďalšou elementárnou operáciou je vynásobenie niektorého riadku skalárom  $c \neq 0$ . Potom priestor prislúchajúci novej matici je  $V_B = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_{i-1}, c\vec{\alpha}_i, \vec{\alpha}_{i+1}, \dots, \vec{\alpha}_m]$ . Pretože  $c\vec{\alpha}_i \in V_A$ , všetky vektory generujúce priestor  $V_B$  patria do  $V_A$ , preto tam patria aj všetky ich lineárne kombinácie, čo znamená  $V_B \subseteq V_A$ . Obrátenú inklúziu  $V_A \subseteq V_B$  dostaneme rovnakým spôsobom: vektor  $\vec{\alpha} = c^{-1} \cdot (c\vec{\alpha})$  totiž patrí do  $V_B$ .

Zostáva nám posledná operácia – pripočítanie násobku niektorého riadku k inému riadku. Bez ujmy na všeobecnosti predpokladajme, že sme pripočítavali  $c$ -násobok druhého riadku k prvému (vektory môžeme ľubovoľne preusporiadať bez toho, aby sme zmenili podpriestor, ktorý generujú). Chceme teda ukázať, že  $V_A = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m] = [\vec{\alpha}_1 + c\vec{\alpha}_2, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_m] = V_B$ . Každý z vektorov generujúcich  $V_B$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m$ , preto platí  $V_B \subseteq V_A = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m]$ . Obrátene, vektor  $\vec{\alpha}_1 = (\vec{\alpha}_1 + c\vec{\alpha}_2) - c\vec{\alpha}_2$  je lineárna kombinácia vektorov, ktoré generujú  $V_B$ , preto platí aj  $V_A \subseteq V_B$ .  $\square$

**Definícia 5.2.8.** Matica  $A$  je *redukovaná trojuholníková matica*, ak:

- (i) Vedúci (=prvý nenulový) prvok každého riadku matice je 1.
- (ii) Každý stĺpec obsahujúci vedúci prvok niektorého riadku má prvky v ostatných riadkoch nulové.
- (iii) Nulové riadky ležia pod nenulovými riadkami. (Presnejšie povedané: Akýkoľvek nulový riadok musí byť nižšie ako akýkoľvek nenulový riadok.)
- (iv) Vedúci prvok ľubovoľného nenulového riadku je napravo od vedúcich prvkov všetkých nenulových riadkov nad ním a naľavo od vedúcich prvkov riadkov pod ním (t.j. vedúce riadky sú usporiadané zľava doprava).

Napríklad matica  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ , ktorú sme dostali v príklade 5.2.4 je redukovaná trojuholníková matica.

Ľubovoľná redukovaná trojuholníková matica vyzerá zhruba takto:

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & \boxed{1} & * & 0 & * & 0 & * & \dots & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & * & 0 & * & \dots & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & * & \dots & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

V predchádzajúcej schéme  $*$  označuje miesta, kde môže byť ľubovoľný prvok (nulový alebo nenulový). Vidíme, že vedúce jednotky (vyznačené štvorčekom) idú zľava doprava

**Veta 5.2.9.** *Každá matica nad polom  $F$  je riadkovo ekvivalentná s nejakou redukovanou trojuholníkovou maticou.*

*Dôkaz.* Nech  $A$  je matica typu  $m \times n$ .

Tvrdenie vety dokážeme indukciou vzhľadom na  $m$  – počet riadkov matice  $A$ .

Ak  $m = 1$ , tak máme jediný riadok. V prípade, že je tento riadok nulový, matica už je v redukovanom trojuholníkovom tvare. Ak nie, tak tento riadok má tvar  $(0, \dots, 0, a_{1s}, a_{1,s+1}, \dots, a_{1n})$ , kde  $a_{1s}$  je prvý nenulový prvok v danom riadku. Vynásobením  $a_{1s}^{-1}$  dostaneme maticu  $(0, \dots, 0, 1, a_{1s}^{-1}a_{1,s+1}, \dots, a_{1s}^{-1}a_{1n})$ , čiže vedúci prvok jej jediného riadku je 1 a táto matica je v redukovanom trojuholníkovom tvare.

Indukčný krok: predpokladáme, že tvrdenie vety platí pre každú maticu, ktorá má  $m$  riadkov, chceme dokázať, že platí aj pre ľubovoľnú maticu  $A$  typu  $(m+1) \times n$ .

Ak  $A$  je nulová matica, tak je v redukovanom trojuholníkovom tvare. V opačnom prípade, nech  $s$  je prvý stĺpec, ktorý je nenulový. Teda tento stĺpec obsahuje aspoň jeden nenulový prvok.

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & a_{1s} & * & * & * & a_{1n} \\ 0 & \dots & 0 & * & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & a_{ks} \neq 0 & * & * & * & a_{kn} \\ 0 & \dots & 0 & * & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & a_{m+1,s} & * & * & * & a_{m+1,n} \end{pmatrix}$$

Výmenou riadkov vieme dostať maticu, ktorá má v  $s$ -tom stĺpci nenulový prvok už v prvom riadku. (Ak to spĺňa už pôvodná matica, nie je potrebné vymieňať riadky.)

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & b_{1s} \neq 0 & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{2s} & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{ks} & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{m+1,s} & * & * & * & * \end{pmatrix}$$

Aby sme v prvom riadku dostali vedúcu jednotku, vynásobíme ho  $b_{1s}^{-1}$ .

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{2s} & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{ks} & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & b_{m+1,s} & * & * & * & * \end{pmatrix}$$

Teraz vieme vynulovať všetky ostatné prvky v  $s$ -tom stĺpci – na to stačí od  $k$ -teho riadku (pre  $k = 2, 3, \dots, m+1$ ) odpočítať  $b_{ks}$ -násobok prvého riadku.

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & c_{2,s+1} & \dots & \dots & c_{2,n} \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & c_{k,s+1} & \dots & \dots & c_{k,n} \\ 0 & \dots & 0 & \vdots & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & c_{m+1,s+1} & \dots & \dots & c_{m+1,n} \end{pmatrix}$$

Teraz nastala správna chvíľa použiť indukčný predpoklad – podľa neho vieme podmaticu pozostávajúcu zo všetkých riadkov predchádzajúcej matice okrem prvého upraviť na redukovanú trojuholníkovú maticu. Takto dostaneme maticu tvaru, ktorý schematicky znázorníme takto:

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & * & * & * & * \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \boxed{1} & 0 & * & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & * & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Inak povedané, podmatica pozostávajúca z riadkov 2 až  $m + 1$  spĺňa definíciu redukovanej trojuholníkovej matice. Jediná podmienka, z definície redukovanej trojuholníkovej matice, ktorá môže byť narušená v celej matici, je, že v niektorom zo stĺpcov obsahujúcich vedúcu jednotku môže táto matica obsahovať nenulový prvok. Pripočítaním vhodného násobku týchto riadkov vieme aj tieto prvky matice vynulovať. (Presnejšie to môžeme zapísať takto: označme prvky prvého riadku v  $(s + 1)$ -vom až  $n$ -tom stĺpci. Nech stĺpce obsahujúce vedúce jednotky sú  $i_2, i_3, \dots, i_k$ . Potom od prvého riadku odpočítame  $c_{1,i_2}$ -násobok 2.riadku,  $c_{1,i_3}$ -násobok 3.riadku, atď.)

$$\begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & * & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \boxed{1} & 0 & * & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & * & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Z naznačených úprav je vidno, že výsledná matica je skutočne redukovaná trojuholníková matica.  $\square$

Predchádzajúci dôkaz vlastne súčasne popisuje aj algoritmus, ako môžeme upraviť ľubovoľnú maticu na redukovaný trojuholníkový tvar.

Ako príklad úpravy na redukovanú trojuholníkovú maticu nám môže opäť poslúžiť príklad 5.2.4.

Zatiaľ sme si povedali, čo sú redukované trojuholníkové matice a vysvetlili sme si postup, akým môžeme z ľubovoľnej matice pomocou elementárnych riadkových úprav dostať redukovanú trojuholníkovú maticu. Teraz by sme chceli ukázať, prečo sú redukované trojuholníkové matice užitočné.

**Veta 5.2.10.** *Nenulové riadky redukovanej trojuholníkovej matice sú lineárne nezávislé.*

Najprv ilustrujme túto vetu na príklade. Opäť použijeme redukovanú trojuholníkovú maticu z príkladu 5.2.4.

**Príklad 5.2.11.** Riadky redukovanej trojuholníkovej matice z príkladu 5.2.4 sú  $\vec{\alpha} = (1, 0, 2)$  a  $\vec{\beta} = (0, 1, \frac{3}{2})$ . Rovnosť  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} = \vec{0}$  znamená, že

$$c(1, 0, 2) + d(0, 1, \frac{3}{2}) = (c, d, 2c + \frac{3}{2}d) = (0, 0, 0),$$

z čoho dostaneme (porovnaním prvých 2 súradníc)  $c = 0$  a  $d = 0$ . Platí teda implikácia  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta} = \vec{0} \Rightarrow c = d = 0$ , čiže vektory  $\vec{\alpha}$  a  $\vec{\beta}$  sú lineárne nezávislé.

Videli sme, že dôležité boli tie súradnice, na ktorých sa nachádzajú vedúce jednotky. V nasledujúcom dôkaze postupujeme takmer identicky ako v príklade, ktorý sme práve uviedli.

*Dôkaz.* Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  sú nenulové riadky redukovanej trojuholníkovej matice  $A$ . Nech  $i_1, \dots, i_k$  sú stĺpce s vedúcimi jednotkami.



Vektor  $c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k$  má na mieste  $i_j$  prvok  $c_j$  (pre  $j = 1, 2, \dots, k$ ), takže rovnosť  $c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k = \vec{0}$  implikuje  $c_j = 0$  (pretože nulový vektor má na tomto mieste nulu). Zistili sme, že platí  $c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k = \vec{0} \Rightarrow c_1 = c_2 = \dots = c_k = 0$ , čiže vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  sú skutočne lineárne nezávislé.  $\square$

**Definícia 5.2.12.** *Hodnosť matice  $A$  je dimenzia podpriestoru  $V_A$  prislúchajúceho tejto matici. Označujeme ju  $h(A)$ .*

Z tejto definície máme rovnosť  $h(A) = d(V_A)$  a pretože elementárne riadkové operácie nemenia priestor prislúchajúci danej matici (veta 5.2.7), nemenia ani hodnosť matice.

Z vety 5.2.10 vyplýva, že hodnosť redukovanej trojuholníkovej matice je počet jej nenulových riadkov. Teda hodnosť matice môžeme rátať pomocou úpravy na redukovanú trojuholníkovú maticu. Pre maticu z príkladu 5.2.4 dostaneme  $h(A) = 2$ .

Okrem toho, že redukované trojuholníkové matice sú užitočné na výpočet hodnosti (a tým aj výpočet dimenzie podpriestoru generovaného nejakými zadanými vektormi), dajú sa využiť aj na to, aby sme zistil, či nejaký vektor patrí do podpriestoru  $V_A$ .

**Príklad 5.2.13.** V príklade 5.2.4 sme ukázali, že matice  $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 2 & -2 & 1 \\ 3 & -2 & 3 \end{pmatrix}$  a  $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & \frac{3}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  sú riadkovo ekvivalentné čo znamená, že  $V_A = V_B = [(1, 0, 2), (0, 1, \frac{3}{2})]$ .

Pokúsme sa zistiť, či vektor  $\vec{\alpha} = (1, 4, 4)$  patrí do  $V_A$ . Ak to platí, musí byť tento vektor lineárnou kombináciou vektorov  $(1, 0, 2)$  a  $(0, 1, \frac{3}{2})$ . Dostávame teda rovnosť

$$(1, 4, 4) = c_1(1, 0, 2) + c_2(0, 1, \frac{3}{2}) = (c_1, c_2, 2c_1 + \frac{3}{2}c_2).$$

Porovnaním prvých dvoch súradníc dostaneme  $c_1 = 1$  a  $c_2 = 4$ . Vektor na pravej strane poslednej rovnice má potom ale tretiu súradnicu rovnú  $2 \cdot 1 + \frac{3}{2} \cdot 4 = 8 \neq 4$ , čiže vektor  $\vec{\alpha}$  nepatrí do  $V_A$ .

Postup z predchádzajúceho príkladu sa dá použiť na dôkaz tohoto tvrdenia:

**Lema 5.2.14.** *Nech  $A$  je redukovaná trojuholníková matica typu  $m \times n$  nad polom  $F$ . Označme jej nenulové riadky  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  a ako  $i_1, \dots, i_k$  označme čísla stĺpcov, v ktorých sú vedúce jednotky. Potom  $\vec{\alpha} = (c_1, \dots, c_n) \in V_A$  práve vtedy, keď  $\vec{\alpha} = c_{i_1}\vec{\alpha}_1 + c_{i_2}\vec{\alpha}_2 + \dots + c_{i_k}\vec{\alpha}_k$ .*

*Dôkaz.* Ak  $\vec{\alpha} \in V_A$ , tak  $\vec{\alpha}$  je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$ , čiže  $\vec{\alpha} = d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_k\vec{\alpha}_k$

Pozrime sa, aká je  $i_j$ -ta súradnica vektoru  $\vec{\alpha} = d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_k\vec{\alpha}_k$ , pre ľubovoľné  $j = 1, 2, \dots, k$ . Na tejto zložke majú vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  nulu s výnimkou vektora  $\vec{\alpha}_j$ , ktorý tam má 1. Preto na  $i_j$ -tej súradnici vektora  $d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_k\vec{\alpha}_k$  je  $d_j$ , dostávame rovnosť  $d_j = c_{i_j}$ . Zistili sme, že koeficienty lineárnej kombinácie sú skutočne rovné  $c_{i_1}, c_{i_2}, \dots, c_{i_k}$ .

Obrátená implikácia je zrejماً.  $\square$

**Veta 5.2.15.** *Ak  $A$  a  $B$  sú redukované trojuholníkové matice rovnakého typu  $m \times n$  nad polom  $F$  a  $V_A = V_B$ , tak  $A = B$ .*

*Dôkaz.* Aby sme ukázali, že 2 redukované trojuholníkové matice sa rovnajú, stačí dokázať, že vedúce jednotky sú v rovnakých stĺpcoch a v ostatných stĺpcoch obsahujú matice rovnaké prvky.

Pretože  $h(A) = h(B)$ , tieto matice majú rovnaký počet nenulových riadkov. Označme ho  $k$ . Nenulové riadky matice  $A$  označme  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  a  $i_1 < i_2 < \dots < i_k$  nech sú čísla stĺpcov, ktoré obsahujú vedúce jednotky. Podobne nenulové riadky matice  $B$  označme  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_k$  a nech vedúce jednotky tejto matice sú v stĺpcoch  $j_1 < j_2 < \dots < j_k$ .

Postupujme sporom. Predpokladajme, že by vedúce jednotky neboli v rovnakých stĺpcoch. Nech  $t$  je prvý index, kde  $i_t \neq j_t$ . Bez ujmy na všeobecnosti môžeme predpokladať  $i_t < j_t$ . Vektor  $\vec{\alpha}_t$  má na miestach  $i_1, \dots, i_{t-1}$  nuly. Preto

$$\vec{\alpha}_t = 0\vec{\beta}_1 + \dots + 0\vec{\beta}_{t-1} + c_t\vec{\beta}_t + c_{t+1}\vec{\beta}_{t+1} + \dots + c_k\vec{\beta}_k.$$

Vektor na pravej strane tejto rovnosti má na prvých  $j_t - 1$  miestach 0, čiže ju má aj na mieste  $i_t$ , čo je spor (keďže sa má rovnať vektoru  $\vec{\alpha}_t$ , ktorý tam má prvok 1).

Zistili sme, že predpoklad  $i_t \neq j_t$  vedie k sporu, preto  $i_t = j_t$ .

Teraz stačí ukázať, že pre všetky  $t = 1, 2, \dots, k$  platí  $\vec{\alpha}_t = \vec{\beta}_t$  – to znamená, že aj ostatné prvky matíc  $A$  a  $B$  sa rovnajú.

Vektor  $\vec{\alpha}_t$  má 0 na miestach  $i_1, \dots, i_{t-1}$  aj  $i_{t+1}, \dots, i_k$  a na mieste  $i_t$  má jednotku. Podľa lemy 5.2.14 teda  $\vec{\alpha}_t = 0\vec{\beta}_1 + \dots + 0\vec{\beta}_{t-1} + 1\vec{\beta}_t + 0\vec{\beta}_{t+1} + 0\vec{\beta}_k$ , čiže  $\vec{\alpha}_t = \vec{\beta}_t$ .  $\square$

Na získanie lepšieho porozumenia predchádzajúceho dôkazu je možno dobre si ukázať jeho najdôležitejší krok na konkrétnom príklade.

**Príklad 5.2.16.** Majme redukovanú trojuholníkovú maticu

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

ktorá má vedúce jednotky v prvom a treťom stĺpci.

Predpokladajme, že by existovala redukovaná trojuholníková matica taká, že  $V_A = V_B$  ale táto matica by mala vedúce jednotky v prvom a štvrtom stĺpci, čiže by mala tvar

$$B = \begin{pmatrix} 1 & b_{12} & b_{13} & 0 & b_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & b_{25} \end{pmatrix}$$

To by znamenalo, že  $(0, 0, 1, 1, 2) \in V_B$  a podľa lemy 5.2.14 z toho dostaneme  $(0, 0, 1, 1, 2) = 0 \cdot (1, b_{12}, b_{13}, 0, b_{15}) + 1 \cdot (0, 0, 0, 1, b_{25})$ , čiže  $(0, 0, 1, 1, 2) = (0, 0, 0, 1, b_{25})$ ; ale tieto vektory sa líšia na tretej súradnici, teda uvedená rovnosť nemôže platiť.

Iný spôsob, ako môžeme ukázať, že  $V_A \neq V_B$ : Ak by sa tieto podpriestory rovnali, tak by platilo  $(0, 0, 0, 1, b_{25}) \in V_A = [(1, 1, 0, 2, 1), (0, 0, 1, 1, 2)]$ . Z lemy 5.2.14 potom dostaneme  $(0, 0, 0, 1, b_{25}) = 0 \cdot (1, 1, 0, 2, 1) + 0 \cdot (0, 0, 1, 1, 2) = (0, 0, 0, 0, 0)$ . Dostali sme teda rovnosť nulového a nenulového vektoru, čo je spor.

Predchádzajúce vety môžeme zhrnúť nasledovne.

**Dôsledok 5.2.17.** *Nech  $A$  a  $B$  sú matice typu  $m \times n$  nad polom  $F$ . Nasledovné podmienky sú ekvivalentné:*

- (i)  $A$  a  $B$  sú riadkovo ekvivalentné,
- (ii)  $V_A = V_B$ ,
- (iii)  $A$  a  $B$  sú riadkovo ekvivalentné s tou istou redukovanou trojuholníkovou maticou.

*Dôkaz.* Veta 5.2.7 vlastne znamená implikáciu (i)  $\Rightarrow$  (ii).

Podľa vety 5.2.9 je  $A$  riadkovo ekvivalentná s nejakou redukovanou trojuholníkovou maticou  $A'$  a  $B$  je ekvivalentná s redukovanou trojuholníkovou maticou  $B'$ . Pretože  $V_{B'} = V_B = V_A = V_{A'}$ , podľa vety 5.2.15  $A' = B'$ . Tým je dokázaná implikácia (ii)  $\Rightarrow$  (iii).

Podľa poznámky 5.2.6, ak  $A \sim T$  a  $B \sim T$  ( $T$  je redukovaná trojuholníková matica), tak aj  $A \sim B$ . Teda platí aj implikácia (iii)  $\Rightarrow$  (i).  $\square$

**Poznámka 5.2.18.** Postup z príkladu 5.2.13 a lemy 5.2.14 môžeme použiť na akúsi „polovičnú skúšku správnosti“ pri počítaní redukovanej trojuholníkovej matice. Pretože podobný postup sa dá použiť aj v iných situáciách, vysvetlíme si ho trochu podrobnejšie.

Z dôsledku 5.2.17 vieme, že ak matica  $A$  je podobná redukovanej trojuholníkovej matici  $B$ , tak  $V_A = V_B$ . Túto rovnosť síce nevieme priamo overiť, vieme však ľahko zistiť, či  $V_A \subseteq V_B$  (tak, že postupne overíme, či jednotlivé riadky matice  $A$  patria do  $V_B$ ; použijeme na to rovnaký postup ako v príklade 5.2.13).

Ak nám takáto „poloskúška“ nevyjde vieme dokonca pomerne jednoducho nájsť poslednú úpravu od konca, v ktorej sme spravili chybu. Skúsme urobiť v úprave nejakej matice na redukovaný trojuholníkový tvar náročky chybu a ilustrovať si, ako ju vieme nájsť.

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 2 & 0 & -1 & -1 \\ 3 & 0 & -4 & -4 \end{pmatrix} \stackrel{(1)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 3 & -5 \\ 0 & 0 & -\frac{5}{2} & -\frac{5}{2} \end{pmatrix} \stackrel{(2)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 3 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(3)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(4)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(5)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Keď urobíme skúšku pre prvú maticu, nevyjde. (Konkrétne pre druhý riadok dostaneme  $2(1, 0, 0, 3) - (0, 0, 1, 1) = (2, 0, -1, 5)$ .)

Aby sme našli chybu, robíme skúšku pre matice, ktoré sme dostali ako medzivýsledky, až kým nenarazíme na situáciu, že pred niektorou úpravou skúška nesedí a po nej už áno. To znamená, že v tejto úprave sa zmenil podpriestor prislúchajúci matici, a teda táto úprava nemôže byť správna.

Napríklad pre maticu po úprave (2) skúška nesedí  $(4 \cdot (0, 1, 0, -\frac{1}{2}) + 3 \cdot (0, 0, 1, 1) = (0, 4, 3, 1))$ . Musíme teda chybu hľadať napravo od tejto matice.

Vyskúšame maticu po úprave (4) – skúška vyjde. Vyskúšame maticu po úprave (3) – skúška opäť vyjde. Keďže pre maticu pred úpravou (3) nám skúška vyšla, ale po nej nie, museli sme spraviť v tejto úprave chybu.

Samozrejme, môže sa stať, že urobíme chybu takého typu, ktorú takáto poloskúška neodhalí.

Správny postup je

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 2 & 0 & -1 & -1 \\ 3 & 0 & -4 & -4 \end{pmatrix} \stackrel{(1)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 3 & -5 \\ 0 & 0 & -\frac{5}{2} & -\frac{5}{2} \end{pmatrix} \stackrel{(2)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 3 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(3)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & -8 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(4)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \stackrel{(5)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

(1)  $3 \cdot r - (3/2) \cdot 2 \cdot r$ ;  $2 \cdot r - 2 \cdot 1 \cdot r$  (Týmto zápisom sa myslí to, že od tretieho riadku sa odpočíta  $(3/2)$ -násobok druhého a od druhého dvojnásobok prvého) (2)  $3 \cdot r - 2/5$  (3)  $2 \cdot r - 3 \cdot 3 \cdot r$  (4)  $2 \cdot r - 1/4$  (5)  $1 \cdot r + 2 \cdot 2 \cdot r + 2 \cdot 3 \cdot r$

**Poznámka 5.2.19.** Ešte na tomto mieste spomeniem jednu často sa vyskytujúcu chybu.

Pomerne často sa študenti robia pri úpravách matíc niečo také, že namiesto pripočítania  $c$ -násobku niektorého riadku k inému urobia  $c$ -násobok niektorého riadku a pripočítajú iný riadok. (Alebo dokonca násobok iného riadku.) Napríklad sa vyskytuje

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -2 & -2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

pričom použitá úprava je  $2r := 1r - 2r$ , t.j. druhý riadok je nahradený rozdielom prvý riadok mínus druhý riadok.

Takáto úprava by bola (v podstate) v poriadku, pretože sme sa od matice  $\begin{pmatrix} \bar{\alpha}_1 \\ \bar{\alpha}_2 \end{pmatrix}$  dostali k matici  $\begin{pmatrix} \bar{\alpha}_1 \\ \bar{\alpha}_1 - \bar{\alpha}_2 \end{pmatrix}$ , ktorá je s pôvodnou maticou riadkovo ekvivalentná. Vieme ju totiž dostať tak, že postupne robíme tieto úpravy: vynásobíme druhý riadok číslom  $(-1)$  a potom

pripočítame prvý riadok (1-násobok prvého riadku).

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -2 & -2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & 2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

Teda sme vlastne iba naraz zapísali viacero úprav naraz, čo sme robili už aj predtým.

Napriek tomu, by som považoval za rozumné sa takémuto typu úprav vyhnúť. (Alebo si aspoň vždy poriadne premyslieť, aké úpravy ste urobili, ak ich takto skombinujete viacero naraz.) Sú na to dva dôvody.

Môže sa potom stať, že spravíte takúto chybu: Urobíte úpravu, že prvý riadok nahradíte rozdielom druhý riadok mínus prvý riadok (čo je v poriadku – len ste spojili viac úprav do jednej) a druhý riadok upravíte podobne ako v predošlom príklade. T.j. spravili sme takéto veci:  $1\mathbf{r}:=2\mathbf{r}-1\mathbf{r}$ ,  $2\mathbf{r}:=1\mathbf{r}-2\mathbf{r}$ . Pozrime sa, čo dostaneme takouto úpravou (a čo vyjde ak pokračujeme ďalej).

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & -2 & -2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0 & -4 & -1 \\ 0 & 4 & 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Takto sme dostali z matice hodnosti 2 maticu hodnosti 1, čiže je tam zjavne niekde chyba. (A určite ľahko prídete na to kde.)

Predošlému problému by sme sa vedeli vyhnúť, ak by sme neurobili viac takýchto „zlých“ úprav naraz. Aj tak sa mi zdá rozumnejšie nezvykať si príliš na používanie úprav takéhoto typu. Dôvod je ten, že aj keď by to bolo v poriadku teraz (kým nás zaujíma len riadková ekvivalencia, hodnosť, podprieostore prislúchajúci matici a podobné veci), mohlo by nám to narobiť problémy pri počítaní determinantov. Neskôr – v časti 6.3.2 – sa naučíme, ako sa dajú používať elementárne riadkové operácie na počítanie determinantov. Budeme využívať fakt, že výmena riadkov mení determinant na opačný, pripočítanie násobku niektorého riadku k inému determinant nezmení, a vynásobenie konštantou  $c$  zmení determinant  $c$ -krát. Ak by sme použili úpravu typu  $2\mathbf{r}:=1\mathbf{r}-2\mathbf{r}$ , tak veľmi ľahko prehliadneme, že táto úprava je zložená z viacerých, kde jedna z nich je vynásobenie matice číslom  $-1$  (a teda aj determinant by sa mal zmeniť na  $(-1)$ -násobok). Veľmi sa to totiž podobá na typ operácie „pripočítanie násobku riadku k inému“ (ako  $2\mathbf{r}:=2\mathbf{r}-1\mathbf{r}$ ), ktoré determinant nemení.

Stručne zhrnuté: Ak používate viacero úprav naraz, treba si vždy poriadne uvedomiť, aké úpravy ste použili. A možno je lepšie nepoužívať naraz viac úprav rôznych typov. (Ak pripočítam násobok prvého riadku k druhému i k tretiemu v tom istom kroku, veľmi sa nemám kde pomýliť. Ak pripočítam k druhému riadku prvý i tretí súčasne, tiež sa nie je veľmi kde pomýliť. Z príkladov, ktoré som uviedol, by mohlo byť vidieť, že ak kombinujem viacero úprav rôznych typov, alebo počítam s už upraveným riadkom, dá sa vcelku ľahko spraviť chyba.)

**Cvičenia** V nasledujúcich úlohách, ak nie je uvedené inak, uvažujeme matice nad poľom  $\mathbb{R}$ .

**Úloha 5.2.1.** Nájdite redukované trojuholníkové matice riadkovo ekvivalentné s nasledujúcimi maticami a) nad poľom  $\mathbb{R}$  b) nad poľom  $\mathbb{Z}_5$

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 3 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 3 & 2 & 2 \\ 0 & 4 & 3 \\ 4 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.2.2.** Ak sa to dá, doplnite dané vektory na bázu vektorového priestoru  $(\mathbb{Z}_5)^4$ :

- $(1, 2, 0, 0), (3, 4, 0, 1)$
- $(1, 2, 3, 4), (1, 1, 1, 1), (3, 2, 1, 0)$
- $(2, 3, 4, 1), (3, 2, 4, 1), (0, 2, 3, 2)$
- $(1, 3, 1, 4), (3, 0, 4, 3), (2, 3, 1, 1)$

**Úloha 5.2.3.** Ak sa to dá, doplňte dané vektory na bázu priestoru

$$S = [(1, 0, 0, 0, 1), (0, 1, 0, 0, 2), (0, 0, 1, 0, 1), (0, 0, 0, 1, 3)] \subseteq (\mathbb{Z}_5)^5.$$

a)  $\vec{\alpha}_1 = (1, 2, 1, 1, 4), \vec{\alpha}_2 = (2, 4, 2, 1, 0)$

b)  $\vec{\alpha}_1 = (1, 1, 2, 4, 2), \vec{\alpha}_2 = (3, 3, 2, 2, 0)$

c)  $\vec{\alpha}_1 = (1, 3, 2, 0, 4), \vec{\alpha}_2 = (2, 1, 4, 0, 3)$

d)  $\vec{\alpha}_1 = (1, 2, 3, 3, 1), \vec{\alpha}_2 = (2, 3, 0, 0, 3)$

**Úloha 5.2.4.** Zistite, či nasledujúce matice tvoria bázu vektorového priestoru všetkých matíc typu  $2 \times 2$  nad poľom  $\mathbb{R}$ :

a)  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ 4 & 2 \end{pmatrix}$  b)  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 0 & 5 \end{pmatrix}$

**Úloha 5.2.5.** Zistite, ktoré z daných vektorov patria do podpriestoru  $[(1, 4, 1, 0), (2, 3, -2, -3), (0, 2, -5, -6)]$  priestoru  $\mathbb{R}^4$ : a)  $(4, 11, -3, -3)$ , b)  $(1, 0, 11, 12)$ , c)  $(3, 0, 4, 1)$ , d)  $(1, -1, 2, -2)$ .

**Úloha 5.2.6.** Zistite, či  $[\vec{\beta}_1, \vec{\beta}_2] \subseteq [\vec{\gamma}_1, \vec{\gamma}_2, \vec{\gamma}_3]$  vo vektorovom priestore  $\mathbb{R}^4$  nad poľom  $\mathbb{R}$ , ak  $\vec{\gamma}_1 = (1, 1, 5, 1), \vec{\gamma}_2 = (1, 0, 2, 1), \vec{\gamma}_3 = (2, 1, 0, 1), \vec{\beta}_1 = (1, 1, 5, 1)$  a  $\vec{\beta}_2 = (-1, 1, -6, -2)$ .

**Úloha 5.2.7.** Zistite hodnoty matíc

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & -1 & 3 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 3 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 2 & -1 & 3 & -2 & 4 \\ 4 & -2 & 5 & 1 & 7 \\ 2 & -1 & 1 & 8 & 2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & -1 \\ 2 & -1 & -3 & 4 \\ 5 & 1 & -1 & 7 \\ 7 & 7 & 9 & 1 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.2.8.** Upravte danú maticu nad poľom  $\mathbb{R}$  na redukovaný trojuholníkový tvar a určte hodnotu matice

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & -2 & 2 \\ 2 & 2 & -1 & -1 \\ 3 & 3 & -4 & -4 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 3 & -1 & 3 & 2 & 5 \\ 5 & -3 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & -3 & -5 & 0 & -7 \\ 7 & -5 & 1 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 5 & 0 & -1 \\ 2 & 6 & 1 & 10 & 0 & 0 \\ 5 & 15 & 2 & 25 & -1 & -4 \\ 3 & 9 & 1 & 15 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 4 & 3 & -5 & 2 & 3 \\ 8 & 6 & -7 & 4 & 2 \\ 4 & 3 & -8 & 2 & 7 \\ 4 & 3 & 1 & 2 & -5 \\ 8 & 6 & -1 & 4 & -6 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.2.9.** Určte hodnotu danej matice v závislosti od parametra  $c \in \mathbb{R}$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & c & -1 & 2 \\ 2 & -1 & c & 5 \\ 1 & 10 & -6 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 3 & 2 & c & 2c \\ 1 & -1 & 3 & -c \\ 2 & 3 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 2 & c+1 & 0 \\ 2 & c-1 & 2c \\ c & c & c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 2 & c+1 & 0 \\ 4 & c-1 & 2c \\ c & c & c \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.2.10.** Zistite, či priestor  $[(2, 4, 4, 2, 4), (3, 1, 1, 2, 2), (4, 3, 3, 2, 0)]$  je podpriestor priestoru  $[(1, 1, 0, 1, 4), (2, 1, 3, 3, 1), (3, 2, 1, 1, 3)]$  a) nad  $\mathbb{Q}$ , b) nad  $\mathbb{Z}_5$ , c) nad  $\mathbb{Z}_7$ .

**Úloha 5.2.11.** Zistite, ktoré z daných matíc sú navzájom riadkovo ekvivalentné:

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 4 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 4 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 2 & 4 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.2.12.** Nájdite bázu daného podpriestoru a určte jeho dimenziu:

a)  $[(1, 1, 0, -1), (0, 1, 2, 1), (1, 0, 1, -1), (1, 1, -6, -3), (-1, -5, 1, 0)]$  v  $\mathbb{R}^4$ ;

b)  $[(1, 2, 2, 0, 1), (1, 2, 0, 1, 2), (1, 2, -2, 1, 0)]$  v  $\mathbb{R}^5$

c)  $[(1, 2, 2, 0, 1), (1, 2, 0, 1, 2), (1, 2, 3, 1, 0)]$  v  $\mathbb{Z}_5^5$

d)  $[(1, 2, 2, 0, 1), (1, 2, 0, 1, 2), (1, 2, 3, 1, 0)]$  v  $\mathbb{Z}_7^5$ .

**Úloha 5.2.13.** Zistite, pre aké hodnoty parametra  $c$  sú dané vektory lineárne závislé

a)  $(-1, 0, -1), (2, 1, 2), (1, 1, c)$  v  $\mathbb{R}^3$ ;

b)  $(1, 1, 3), (2, 1, 2), (c, 0, -c)$  v  $\mathbb{R}^3$ ;

c)  $(2, 0, -1), (3, 2, 0), (1, -2, c)$  v  $\mathbb{R}^3$ .

**Úloha 5.2.14\*.** Určte hodnotu matice:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n & a_{n+1} \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_n^2 & a_{n+1}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_1^n & a_2^n & \dots & a_n^n & a_{n+1}^n \end{pmatrix}$$

ak viete, že  $a_1, \dots, a_{n+1}$  sú navzájom rôzne reálne čísla (t.j.  $a_i \neq a_j$  pre všetky  $i \neq j$ ).

Pri riešení tejto úlohy môžete použiť fakt, že elementárne stĺpcové operácie nemenia hodnotu, resp. to, že  $h(A) = h(A^T)$ . (Tento fakt dokážeme neskôr.) Ale mala by sa dať vyriešiť aj bez použitia tejto veci.

Všetky príklady, v ktorých vystupujú len celé čísla, si môžete upraviť tak, že jednotlivé členy matice nahradíte ich zvyškami po delení 3 (5, 7) a riešite rovnakú úlohu nad  $\mathbb{Z}_3$  ( $\mathbb{Z}_5$ ,  $\mathbb{Z}_7$ ).

### 5.3 Lineárne zobrazenia

V tejto časti zavedieme vlastne najdôležitejší koncept tejto prednášky – lineárne zobrazenia. Ak by sme povedali, že všetko čo sme robili doteraz sme robili iba s cieľom, aby sme si pripravili vhodné prostriedky na popis lineárnych zobrazení, neboli by sme ďaleko od pravdy. Táto prednáška totiž do veľkej miery smeruje k tomu, aby sme pochopili lineárne javy, ktoré sa v matematike (ale aj vo fyzike a ďalších aplikáciach) popisujú práve pomocou lineárnych zobrazení.

**Definícia 5.3.1.** Ak  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad poľom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je zobrazenie z  $V$  do  $W$ , tak hovoríme, že  $f$  je *lineárne zobrazenie*, ak pre ľubovoľné  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$  a ľubovoľné  $c \in F$  platí

$$(i) \quad f(\vec{\alpha} + \vec{\beta}) = f(\vec{\alpha}) + f(\vec{\beta}),$$

$$(ii) \quad f(c\vec{\alpha}) = cf(\vec{\alpha}).$$

Inými slovami, lineárne zobrazenia sú tie zobrazenia, ktoré zachovávajú základné operácie popisujúce vektorový priestor.

Asi sa hodí ilustrovať nový pojem na niekoľkých príkladoch. Začnime najprv nejakými veľmi triviálnymi:

**Príklad 5.3.2.** Uvažujme identické zobrazenie  $id_V: V \rightarrow V$ , t.j.  $id_V(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha}$ . (Pričom  $V$  je ľubovoľný vektorový priestor nad nejakým poľom  $F$ .) Prakticky ihneď vidno, že ide o lineárne zobrazenie, lebo podmienky z definície 5.3.1 aplikované na toto konkrétne zobrazenie sú rovnosti

$$\begin{aligned} \vec{\alpha} + \vec{\beta} &= \vec{\alpha} + \vec{\beta}, \\ c\vec{\alpha} &= c\vec{\alpha}, \end{aligned}$$

ktoré očividne platia pre ľubovoľné  $c \in F$ ,  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$ .

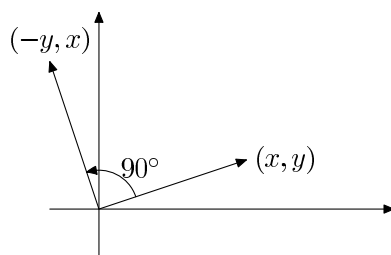
Iný triviálny príklad dostaneme, ak vezmeme nejaké dva vektorové priestory  $V, W$  nad tým istým poľom  $F$  a definujeme

$$f(\vec{\alpha}) = \vec{0}$$

pre  $\vec{\alpha} \in V$ . (T.j. každému vektoru sme priradili nulový vektor. Môžeme toto zobrazenie nazvať *nulové zobrazenie*.) Opäť je veľmi ľahké skontrolovať, že ide o lineárne zobrazenie, vlastne si stačí všimnúť, že platia rovnosti

$$\begin{aligned} \vec{0} &= \vec{0} + \vec{0}, \\ \vec{0} &= c\vec{0}. \end{aligned}$$

Azda sa teraz môžeme skúsiť posunúť k zaujímavejším (menej triviálnym) príkladom.

Obr. 5.1: Otočenie v rovine o  $90^\circ$ 

**Príklad 5.3.3.** Otočenie v rovine o  $90^\circ$  je lineárne zobrazenie.

Otočenie v rovine o  $90^\circ$  má vyjadrenie v súradniciach<sup>1</sup>

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

Overme podmienky z definície lineárneho zobrazenia:

$$f(x, y) + f(x', y') = (-y, x) + (-y', x') = -(y + y'), x + x' = f(x + x', y + y'),$$

$$f(cx, cy) = (-cy, cx) = c(-y, x) = cf(x, y).$$

**Príklad 5.3.4.** Zobrazenie  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  určené predpisom  $f(x, y) = (2x + y, x + 3y)$  je lineárne zobrazenie. (V istom zmysle je typickým príkladom lineárneho zobrazenia, ako uvidíme neskôr.)

$$\begin{aligned} f(x, y) + f(x', y') &= (2x + y, x + 3y) + (2x' + y', x' + 3y') = \\ &= (2(x + x') + y + y', x + x' + 3(y + y')) = f(x + x', y + y'), \end{aligned}$$

$$f(cx, cy) = (2cx + cy, cx + 3cy) = c(2x + y, x + 3y) = cf(x, y).$$

Veľmi podobne by sme vedeli ukázať, že pre ľubovoľné reálne čísla  $a, b, c, d$  predpis

$$f(x, y) = (ax + by, cx + dy)$$

určuje lineárne zobrazenie. Neskôr uvidíme, ako sa to dá zovšeobecniť a tiež to, že každé lineárne zobrazenie  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  vyzerá takto; pozri poznámku 5.4.11.

**Veta 5.3.5.** *Nech  $V, W$  sú vektorové priestory nad poľom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je zobrazenie. Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:*

(a) zobrazenie  $f$  je lineárne,

(b)  $f(c\vec{\alpha} + d\vec{\beta}) = cf(\vec{\alpha}) + df(\vec{\beta})$  pre ľubovoľné  $c, d \in F$  a ľubovoľné  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$ ,

(c)  $f(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n) = c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n)$  pre ľubovoľné  $c_1, \dots, c_n \in F$ ,  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n \in V$ .

(d)  $f(c\vec{\alpha} + \vec{\beta}) = cf(\vec{\alpha}) + f(\vec{\beta})$  pre ľubovoľné  $c \in F$  a  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$ .

Tretia podmienka v predchádzajúcej vete hovorí, že lineárne zobrazenia sú práve zobrazenia zachovávajúce lineárne kombinácie.

<sup>1</sup>Keby sme boli presní, mali by sme písať  $f((x, y))$  – jednu zátvorku kvôli zobrazeniu a druhú z označenia vektora. Rozhodli sme sa, že si zápis trochu zjednodušíme.

*Dôkaz.* (a)  $\Rightarrow$  (b) Vyplýva priamo z definície lineárneho zobrazenia.

$$f(c\vec{\alpha} + d\vec{\beta}) \stackrel{(i)}{=} f(c\vec{\alpha}) + f(d\vec{\beta}) \stackrel{(ii)}{=} cf(\vec{\alpha}) + df(\vec{\beta})$$

(b)  $\Rightarrow$  (c) Dostaneme opakovaným použitím (b). (Formálny dôkaz by sme urobili pomocou matematickej indukcie.)

(c)  $\Rightarrow$  (a) Ak dosadíme  $n = 1$  dostaneme podmienku (ii) z definície lineárneho zobrazenia. Pre  $n = 2$  a  $c_1 = c_2 = 1$  máme podmienku (i).

Ak už máme overenú ekvivalenciu prvých troch podmienok, tak ukázať, že aj (d) je s nimi ekvivalentná je pomerne jednoduché. Túto časť dôkazu som ponechal ako cvičenie – úloha 5.3.2.  $\square$

**Tvrdenie 5.3.6.** Ak  $f$  je lineárne zobrazenie, tak  $f(\vec{0}) = \vec{0}$ .

*Dôkaz.*

$$f(\vec{0}) = f(\vec{0} + \vec{0}) = f(\vec{0}) + f(\vec{0})$$

Vykrátením  $f(\vec{0})$  dostaneme  $f(\vec{0}) = \vec{0}$ .  $\square$

Nasledujúcu vetu niektorí autori nazývajú *základná veta o lineárnych zobrazeniach*.

**Veta 5.3.7.** Nech  $V, W$  sú vektorové priestory. Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  je báza priestoru  $V$  a nech  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_n \in W$ . Potom existuje práve jedno lineárne zobrazenie  $f: V \rightarrow W$  také, že

$$f(\vec{\alpha}_i) = \vec{\beta}_i$$

pre  $i = 1, 2, \dots, n$ .

*Dôkaz.* Nech  $\vec{\alpha} \in V$ . Pretože  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  tvorí bázu priestoru  $V$ , existujú jednoznačne určené skaláry  $c_1, \dots, c_n \in F$  také, že

$$\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n.$$

Potom  $f(\vec{\alpha})$  definujeme ako

$$f(\vec{\alpha}) = c_1\vec{\beta}_1 + \dots + c_n\vec{\beta}_n.$$

(Pretože  $c_1, \dots, c_n$  sú jednoznačne určené, je  $f$  dobre definované, t.j., nemôže sa stať, že by sme takto tomu istému  $\vec{\alpha}$  priradili dve rôzne hodnoty. Súčasne  $f(\vec{\alpha})$  nemôže mať inú hodnotu, ak to má byť lineárne zobrazenie – vyplýva to z toho, že lineárne zobrazenia zachovávajú lineárne kombinácie. Z toho vyplýva jednoznačnosť zobrazenia  $f$ .)

Ukážeme, že takto definované zobrazenie je skutočne lineárne. Uvažujme dva vektory

$$\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$$

$$\vec{\alpha}' = d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n$$

Potom platí

$$\vec{\alpha} + \vec{\alpha}' = (c_1 + d_1)\vec{\alpha}_1 + \dots + (c_n + d_n)\vec{\alpha}_n$$

$$f(\vec{\alpha} + \vec{\alpha}') = (c_1 + d_1)\vec{\beta}_1 + \dots + (c_n + d_n)\vec{\beta}_n = c_1\vec{\beta}_1 + \dots + c_n\vec{\beta}_n + d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_n\vec{\beta}_n = f(\vec{\alpha}) + f(\vec{\alpha}')$$

Podobne dostaneme

$$c.\vec{\alpha} = cc_1\vec{\alpha}_1 + \dots + cc_n\vec{\alpha}_n$$

$$f(c.\vec{\alpha}) = cc_1\vec{\beta}_1 + \dots + cc_n\vec{\beta}_n = c(c_1\vec{\beta}_1 + \dots + c_n\vec{\beta}_n) = c.f(\vec{\alpha})$$

$\square$



Lineárne zobrazenie je jednoznačne určené obrazmi prvkov (ľubovoľnej) bázy.  
V priestore  $F^n$  máme štandardnú bázu

$$\vec{\varepsilon}_1 = (1, 0, \dots, 0), \vec{\varepsilon}_2 = (0, 1, \dots, 0), \dots, \vec{\varepsilon}_n = (0, \dots, 0, 1).$$

Táto báza nám umožní popísať ľubovoľné zobrazenie z  $F^n$  do  $F^k$  spôsobom, ktorý je v istom zmysle kanonický.

**Definícia 5.3.8.** Nech  $F$  je pole. *Matica lineárneho zobrazenia*  $f: F^m \rightarrow F^n$  je matica typu  $m \times n$  ktorej  $k$ -ty riadok je vektor  $f(\vec{\varepsilon}_k)$ .

Maticu zobrazenia  $f$  budeme označovať  $A_f$ .

Každému lineárnemu zobrazeniu  $f: F^m \rightarrow F^n$  sme takto priradili nejakú maticu  $A_f$  typu  $m \times n$ .

Obrátene, ľubovoľnou maticou typu  $m \times n$  je jednoznačne určené lineárne zobrazenie  $f: F^m \rightarrow F^n$ . (Riadky matice určujú obrazy bázových vektorov, jednoznačnosť a existencia takéhoto zobrazenia vyplývajú z vety 5.3.7.) Lineárne zobrazenie prislúchajúce matici  $A$  budeme označovať  $f_A$ .

**Príklad 5.3.9.** Uvažujme lineárne zobrazenie  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  dané predpisom  $f(x, y) = (2x + y, x + y, x + 2y)$ . Dosadením zistíme, že platí

$$\begin{aligned} f(\vec{\varepsilon}_1) &= f(1, 0) = (2, 1, 1) \\ f(\vec{\varepsilon}_2) &= f(0, 1) = (1, 1, 2) \end{aligned}$$

Teda matica tohoto zobrazenia je

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

**Veta 5.3.10.** Nech  $U, V, W$  sú vektorové priestory nad tým istým polom  $F$ . Ak  $f: U \rightarrow V$  a  $g: V \rightarrow W$  sú lineárne zobrazenia, tak aj  $g \circ f$  je lineárne zobrazenie.

*Dôkaz.* Na overenie použijeme podmienku (b) z vety 5.3.5. Nech  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in U$  a  $c, d \in F$ . Potom dostaneme

$$g(f(c\vec{\alpha} + d\vec{\beta})) = g(cf(\vec{\alpha}) + df(\vec{\beta})) = cg(f(\vec{\alpha})) + dg(f(\vec{\beta})).$$

(Využili sme najprv linearitu zobrazenia  $f$  a potom linearitu zobrazenia  $g$ .) □

**Poznámka 5.3.11.** Lahko sa overí, že ak  $f, g: V \rightarrow W$  sú lineárne zobrazenia, tak aj zobrazenia  $f + g$  a  $c.f$  sú lineárne.

Teraz si ukážeme na konkrétnom príklade, ako vieme nájsť maticu lineárneho zobrazenia, ak máme dané obrazy niektorých vektorov. (V prípade, že tieto vektory tvoria bázu, také zobrazenie existuje podľa vety 5.3.7.)

**Úloha 5.3.1.** Nájdite maticu lineárneho zobrazenia  $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^4$ , pre ktoré platí:

- $f(2, 0, 3) = (1, 2, -1, 1)$ ,  $f(4, 1, 5) = (4, 5, -2, 1)$ ,  $f(3, 1, 2) = (1, -1, 1, -1)$ ,
- $f(2, 0, 3) = (1, 2, -1, 1)$ ,  $f(4, 1, 5) = (4, 5, -2, 1)$ ,  $f(2, -1, 4) = (-1, 1, -1, 2)$ ,
- $f(2, 0, 3) = (1, 2, -1, 1)$ ,  $f(4, 1, 5) = (4, 5, -2, 1)$ ,  $f(2, -1, 4) = (1, -1, 1, -1)$ .

Postupujeme tak, že si napíšeme do matice vektory a ich obrazy a ľavú časť sa snažíme upraviť riadkovými úpravami na jednotkovú maticu (aby sme našli obrazy vektorov  $\vec{\varepsilon}_i$ )

$$\left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & 1 & 5 & 4 & 5 & -2 & 1 \\ 3 & 1 & 2 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -\frac{5}{2} & -\frac{1}{2} & 4 & \frac{5}{2} & -1 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} & -\frac{5}{2} & -5 & \frac{5}{2} & -\frac{3}{2} \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -2 & -4 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{11}{3} & \frac{13}{3} & -\frac{5}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{5}{3} & \frac{10}{3} & -\frac{5}{3} & 1 \end{array} \right)$$

Hľadaná matica je  $\begin{pmatrix} -2 & -4 & 2 & -1 \\ \frac{11}{3} & \frac{13}{3} & -\frac{5}{3} & 0 \\ \frac{5}{3} & \frac{10}{3} & -\frac{5}{3} & 1 \end{pmatrix}$ .

Základná myšlienka algoritmu, ktorý sme práve popísali, je v tom, že po každom kroku platí, že vektor na ľavej strane sa zobrazením s danými vlastnosťami zobrazí na vektor napravo od neho. Skutočne, ak máme v nejakom kroku  $f(\vec{\alpha}_i) = \vec{\beta}_i$  a  $f(\vec{\alpha}_j) = \vec{\beta}_j$  (kde  $\vec{\alpha}_k$  a  $\vec{\beta}_k$  označujú  $k$ -ty riadok ľavej resp. pravej časti matice) a pripočítame k  $i$ -temu riadku  $c$ -násobok  $j$ -teho riadku, platí tento vzťah aj pre riadky novej matice:

$$f(\vec{\alpha}_i + c\vec{\alpha}_j) = f(\vec{\alpha}_i) + cf(\vec{\alpha}_j) = \vec{\beta}_i + c\vec{\beta}_j.$$

Podobne sa to dá overiť pre ostatné elementárne riadkové operácie.<sup>2</sup>

Skúšku správnosti môžeme urobiť tak, že overíme, či  $f$  naozaj nadobúda zadané hodnoty, napríklad  $f(3, 1, 2) = 3(-2, -4, 2, -1) + 1(\frac{11}{3}, \frac{13}{3}, -\frac{5}{3}, 0) + 2(\frac{5}{3}, \frac{10}{3}, -\frac{5}{3}, 1) = (1, -1, 1, -1)$ .

V prípade, že skúška nevyjde, chybu môžeme hľadať tak, že skúšame pre medzivýsledky, či sa vektor na ľavej strane zobrazí na vektor ležiaci od neho napravo v zobrazení určenom maticou, ktorá nám vyšla. Samozrejme chybu môžeme hľadať aj tak, že kontrolujeme jednotlivé úpravy.

$$\text{b) } \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & 1 & 5 & 4 & 5 & -2 & 1 \\ 2 & -1 & 4 & -1 & 1 & -1 & 2 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & -2 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Vidíme, že môžeme  $f(0, 0, 1)$  zvoliť ľubovoľne. Označme  $f(0, 0, 1) = (a, b, c, d)$ . Potom dostaneme

$$\left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & a & b & c & d \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{1-3a}{2} & 1-\frac{3}{2}b & \frac{1-3c}{2} & 1-\frac{3}{2}d \\ 0 & 1 & 0 & 2+a & 1+b & c & -1+d \\ 0 & 0 & 1 & a & b & c & d \end{array} \right)$$

Pre každé  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$  je táto matica maticou zobrazenia  $f$  s požadovanými vlastnosťami.

$$\text{c) } \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 4 & 1 & 5 & 4 & 5 & -2 & 1 \\ 2 & -1 & 4 & -1 & 1 & -1 & 2 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -3 & -2 & -2 \end{array} \right) \sim \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 3 & 1 & 2 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & -2 & -2 \end{array} \right)$$

Pre lineárne zobrazenie  $f$ , ktoré by spĺňalo podmienky zo zadania by muselo platiť  $f(0, 0, 0) = (2, -2, -2, -2)$ , ale také lineárne zobrazenie neexistuje. (Lineárne zobrazenie vždy zobrazuje nulový vektor na nulový vektor.)

## Cvičenia

**Úloha 5.3.2.** Ukážte, že  $f: V \rightarrow W$  je lineárne práve vtedy, keď pre ľubovoľné  $c \in F$  a  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$  platí  $f(c\vec{\alpha} + \vec{\beta}) = cf(\vec{\alpha}) + f(\vec{\beta})$ .

**Úloha 5.3.3.** Nájdite maticu lineárneho zobrazenia  $f: (\mathbb{Z}_7)^2 \rightarrow (\mathbb{Z}_7)^2$  a napíšte jeho predpis.

a)  $f(1, 1) = (0, 1)$ ,  $f(6, 1) = (3, 2)$

b)  $f(2, 3) = (1, 0)$ ,  $f(3, 2) = (6, 1)$

**Úloha 5.3.4.** Nájdite maticu lineárneho zobrazenia  $f: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^4$  takého, že:

a)  $f(1, 2, 3, 1) = (1, 3, 1, 0)$ ,  $f(2, 1, 3, 0) = (0, 1, 3, 1)$ ,  $f(3, 2, 1, 0) = (1, 0, 3, 0)$ ,  $f(2, 2, 3, 4) = (3, 1, 0, 4)$

b)  $f(1, 2, 3, 4) = (0, 0, 0, 0)$ ,  $f(2, 1, 3, 1) = (1, 0, 3, 1)$ ,  $f(0, 1, 2, 0) = (2, 0, 1, 0)$ ,  $f(1, 0, 3, 1) = (2, 1, 3, 1)$

c)  $f(0, 1, 1, 1) = (1, 0, 0, 0)$ ,  $f(1, 0, 1, 1) = (0, 1, 0, 0)$ ,  $f(1, 1, 0, 1) = (0, 0, 1, 0)$ ,  $f(1, 1, 1, 0) = (0, 0, 0, 1)$

<sup>2</sup>Takýto postup je typický pri dokazovaní správnosti algoritmov. Našli sme tvrdenie, ktoré platí po každom kroku algoritmu. (Nazývame ho *invariant*.) O tomto invariante treba dokázať, že: a) platí na začiatku výpočtu; b) vykonanie jedného kroku algoritmu nezmení platnosť invariantu; c) ak platí invariant na konci výpočtu, tak algoritmus skutočne robí, to čo má.

**Úloha 5.3.5.** Nech  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad poľom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie. Ak  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne závislé vektory, tak aj  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  sú lineárne závislé vektory.

**Úloha 5.3.6.** Nech  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie z vektorového priestoru  $V$  do vektorového priestoru  $W$  nad poľom  $F$ . Dokážte:

Ak  $S$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$ , tak  $f[S] = \{f(\vec{\alpha}); \vec{\alpha} \in S\}$  je podpriestor vektorového priestoru  $W$ .

Ak  $T$  je podpriestor vektorového priestoru  $W$ , tak  $f^{-1}(T) = \{\vec{\alpha} \in V : f(\vec{\alpha}) \in T\}$  je podpriestor vektorového priestoru  $V$ .

## 5.4 Súčin matic

V predchádzajúcej časti sme sa naučili, že lineárne zobrazenie  $F^m \rightarrow F^n$  je jednoznačne určené maticou typu  $m \times n$  a obrátene, každému takémuto lineárnemu zobrazeniu prislúcha jeho matica. Tiež sme sa dozvedeli, že zložením lineárnych zobrazení opäť vznikne lineárne zobrazenie. Preto je prirodzená otázka ako vyzerá matica prislúchajúca zloženému zobrazeniu.

**Príklad 5.4.1.** Uvažujme zobrazenie  $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  určené maticou  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$  a zobrazenie  $g: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$  určené maticou  $\begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ . Pokúsme sa vypočítať maticu zloženého zobrazenia  $A_{g \circ f}$ .

Budeme označovať štandardnú bázu v  $\mathbb{R}^2$  ako  $\vec{\delta}_1, \vec{\delta}_2$  a štandardnú bázu v  $\mathbb{R}^3$  ako  $\vec{\varepsilon}_1, \vec{\varepsilon}_2, \vec{\varepsilon}_3$ . Vypočítajme obrazy vektorov štandardnej bázy:

$$\begin{aligned} g(f(\vec{\delta}_1)) &= g(1, 0, 2) = g(\vec{\varepsilon}_1 + 2\vec{\varepsilon}_3) = g(\vec{\varepsilon}_1) + 2g(\vec{\varepsilon}_3) = (3, 1) + 2 \cdot (0, -1) = (3, -1) \\ g(f(\vec{\delta}_2)) &= g(2, 1, 1) = g(2\vec{\varepsilon}_1 + \vec{\varepsilon}_2 + \vec{\varepsilon}_3) = 2g(\vec{\varepsilon}_1) + g(\vec{\varepsilon}_2) + g(\vec{\varepsilon}_3) = 2 \cdot (3, 1) + (1, 1) + (0, -1) = (7, 2) \end{aligned}$$

Z toho dostávame

$$A_{g \circ f} = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 7 & 2 \end{pmatrix}.$$

Pokúsme sa zopakovať tento výpočet vo všeobecnosti. Máme teda dve lineárne zobrazenia a im prislúchajúce matice:

$$\begin{aligned} f: F^m \rightarrow F^n \quad A_f &= \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \text{ typu } m \times n \\ g: F^n \rightarrow F^k \quad A_g &= \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nk} \end{pmatrix} \text{ typu } n \times k \end{aligned}$$

Opäť nech  $\vec{\delta}_1, \dots, \vec{\delta}_m$  je štandardná báza  $F^m$  a  $\vec{\varepsilon}_1, \dots, \vec{\varepsilon}_n$  je štandardná báza  $F^n$ .

Pretože  $g \circ f: F^m \rightarrow F^k$  je matica zloženého zobrazenia matica typu  $m \times k$ . Riadky matice  $A_{g \circ f}$  sú vektory  $g(f(\vec{\delta}_1)), g(f(\vec{\delta}_2)), \dots, g(f(\vec{\delta}_m))$ .

Nech  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ . Vypočítajme príslušný riadok matice  $A_{g \circ f}$ .

$$\begin{aligned} g(f(\vec{\delta}_i)) &= g(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) = \\ &= g(a_{i1}\vec{\varepsilon}_1 + a_{i2}\vec{\varepsilon}_2 + \dots + a_{in}\vec{\varepsilon}_n) = g(a_{i1}\vec{\varepsilon}_1) + g(a_{i2}\vec{\varepsilon}_2) + \dots + g(a_{in}\vec{\varepsilon}_n) = \\ &= a_{i1}(b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1k}) + \\ &= a_{i2}(b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2k}) + \\ &= \vdots \\ &= a_{in}(b_{n1}, b_{n2}, \dots, b_{nk}) = \\ &= (a_{i1}b_{11} + a_{i2}b_{21} + \dots + a_{in}b_{n1}, a_{i1}b_{12} + a_{i2}b_{22} + \dots + a_{in}b_{n2}, \dots, a_{i1}b_{1k} + a_{i2}b_{2k} + \dots + a_{in}b_{nk}) \end{aligned}$$

Vektor  $g(f(\vec{\delta}_i))$  má na  $j$ -tej súradnici hodnotu

$$c_{ij} := a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj} = \sum_{t=1}^n a_{it}b_{tj}.$$

Matica zloženého zobrazenia je matica  $A_{g \circ f} = \|c_{ij}\|$  typu  $m \times k$ .

Všimnime si, že prvok  $c_{ij}$  vlastne získame tak, že vezmeme  $i$ -ty riadok matice  $A$  a  $j$ -ty stĺpec matice  $B$  (dostaneme tak 2 vektory rovnakej dĺžky  $n$ ), vynásobíme hodnoty na rovnakých súradniciach a takto získané hodnoty sčítame. (Je to vlastne skalárny súčin  $i$ -teho riadku matice  $A$  a  $j$ -teho stĺpca matice  $B$  – o skalárnom súčine ešte budeme hovoriť neskôr.)

**Definícia 5.4.2.** Ak  $A$  je matica typu  $m \times n$  a  $B$  je matica typu  $n \times k$  nad poľom  $F$ , tak maticu  $C = \|c_{ij}\|$  typu  $m \times k$ , kde

$$c_{ij} = \sum_{t=1}^n a_{it}b_{tj}$$

pre  $i = 1, 2, \dots, m$  a  $j = 1, 2, \dots, k$ , nazývame *súčin matíc*  $A$  a  $B$ . Označujeme ju  $AB$  alebo  $A \cdot B$ .

Dôležité je si všimnúť, že súčin matíc definujeme iba v prípade, že počet stĺpcov prvej matice sa rovná počtu riadkov druhej matice.

$$m \times \boxed{n} \times k$$

Výsledok je matica typu  $m \times k$ .

**Príklad 5.4.3.**  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 7 & 2 \end{pmatrix}$   
 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

**Veta 5.4.4.** Nech  $F$  je pole,  $f: F^m \rightarrow F^n$  a  $g: F^n \rightarrow F^k$  sú lineárne zobrazenia. Potom platí

$$A_{g \circ f} = A_f \cdot A_g$$

*Dôkaz.* Súčin matíc sme definovali práve tak, aby platil predchádzajúci vzťah. (Dôkaz tejto vety spočíva vlastne v odvodení vzťahu pre  $A_{g \circ f}$ , ktoré sme uviedli za príkladom 5.4.1.)  $\square$

POZOR na zmenu poradia v predchádzajúcej vete. T.j. matice na pravej strane rovnosti sú zapísané v inom poradí ako je zápis skladania zobrazení. (Opäť platí, že niektoré knihy, ako napríklad [KGGs], definujú poradie skladania zobrazení inak, čo samozrejme ovplyvní aj poradie v predchádzajúcej rovnosti.)

**Príklad 5.4.5.** Nie je ťažké uviesť si, že otočenie v rovine o uhol  $\alpha$  (proti smeru pohybu hodinových ručičiek) je lineárne zobrazenie a jeho matica je

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

(Pre  $\alpha = 90^\circ$  sme sa na toto zobrazenie pozreli v príklade 5.3.3.)

Ak zložíme otočenie o uhol  $\alpha$  a otočenie o uhol  $\beta$ , mali by sme dostať otočenie o uhol  $\alpha + \beta$ . Už vieme, že zloženému zobrazeniu zodpovedá súčin matíc. Pozrime sa, čo dostaneme ako súčin matíc týchto dvoch zobrazení.

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta \end{pmatrix}$$

Ak si spomenieme na vzorce pre trigonometrické funkcie súčtu uhlov

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta) &= \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta, \\ \sin(\alpha + \beta) &= \cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta, \end{aligned}$$

tak vidíme, že matica na pravej strane rovnosti sa skutočne rovná  $\begin{pmatrix} \cos(\alpha+\beta) & \sin(\alpha+\beta) \\ -\sin(\alpha+\beta) & \cos(\alpha+\beta) \end{pmatrix}$ .

Navyše ak tieto vzorce zabudneme, tak násobenie matíc nám dáva možnosť, ako si ich ľahko odvodiť. (Iná možnosť, ako si ich zapamätať, je násobenie komplexných čísel – pozri dôkaz vety B.2.3.)

**Dôsledok 5.4.6.** *Násobenie matíc je asociatívne, teda*

$$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$$

pre ľubovoľné matice také, že ich možno násobiť v uvedenom poradí.

*Dôkaz.* Ľubovoľná matica je matica nejakého lineárneho zobrazenia. Označme zobrazenia prislúchajúce daným maticiam  $f$ ,  $g$  a  $h$ . Dostaneme

$$A_f \cdot (A_g \cdot A_h) = A_f \cdot (A_{hog}) = A_{(hog)of} = A_{ho(gof)} = A_{gof} \cdot A_h = (A_f \cdot A_g) \cdot A_h.$$

(Inak povedané, vďaka tomu, že poznáme vzťah medzi násobením matíc a skladaním zobrazení, asociatívnosť násobenia matíc ľahko vyplýva z asociatívnosti skladania zobrazení.)  $\square$

To isté tvrdenie môžeme dokázať aj priamo z definície súčinu.

*Dôkaz.* Majme matice  $A$ ,  $B$ ,  $C$  typov  $m \times n$ ,  $n \times k$ ,  $k \times l$ . Vyjadríme prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci matice  $A(BC)$ . Dostaneme

$$\sum_{t=1}^n a_{it} \sum_{u=1}^k b_{tu} c_{uj} = \sum_{t=1}^n \sum_{u=1}^k a_{it} (b_{tu} c_{uj}).$$

Keď vypočítame prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci matice  $(AB)C$  dostaneme

$$\sum_{u=1}^k \left( \sum_{t=1}^n a_{it} b_{tu} \right) c_{uj} = \sum_{u=1}^k \sum_{t=1}^n (a_{it} b_{tu}) c_{uj},$$

čiže presne tú istú sumu, len s iným poradím sčítovania.  $\square$

**Príklad 5.4.7.** Násobenie matíc nie je komutatívne. (Vyplýva to aj z toho, že nie vždy, keď je definovaný súčin  $AB$  je definovaný aj súčin  $BA$ . Ukážeme si však aj príklad, kde sú súčiny v oboch poradiach definované, ale rôzne.)

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$$

**Veta 5.4.8.** *Nech matice  $A, B, C$  nad polom  $F$  majú také rozmery, že uvedené súčty a súčiny majú zmysel.*

$$\begin{aligned} I_m A &= A = A I_n \\ A(B + C) &= AB + AC \\ (B + C)D &= BD + CD \end{aligned}$$

*Dôkaz.* Rovnosť dvoch výrazov obsahujúcich matice môžeme overiť tak, že vypočítame prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci matice na ľavej a pravej strane rovnosti a výsledky porovnáme.

Prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci matice  $I_m A$  má tvar

$$c_{ij} = \delta_{i1}a_{1j} + \delta_{i2}a_{2j} + \dots + \delta_{im}a_{mj},$$

kde ako  $\delta_{ij}$  sme označili prvok  $i$ -teho riadku a  $j$ -teho stĺpca jednotkovej matice  $I_m$  (pozri tiež poznámku 5.1.7). Pretože z čísel  $\delta_{ij}$  je len  $\delta_{ii} = 1$  a ostatné sú nulové, dostávame z predchádzajúcej rovnosti priamo

$$c_{ij} = a_{ij}.$$

Vzťah pre násobenie jednotkovou maticou sprava sa overí rovnako.

Označme  $D := A(B + C)$ . Potom

$$\begin{aligned} d_{ij} &= a_{i1}(b_{1j} + c_{1j}) + a_{i2}(b_{2j} + c_{2j}) + \dots + a_{in}(b_{nj} + c_{nj}) = \\ &= a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj} + a_{i1}c_{1j} + a_{i2}c_{2j} + \dots + a_{in}c_{nj}, \end{aligned}$$

čo je presne súčet prvkov  $i$ -teho riadku a  $j$ -teho stĺpca matíc  $AB$  a  $AC$ . Teda skutočne platí

$$A(B + C) = AB + AC.$$

Predchádzajúce odvodenie by sme mohli stručnejšie a prehľadnejšie zapísať ako

$$d_{ij} = \sum_{t=1}^n a_{it}(b_{tj} + c_{tj}) = \sum_{t=1}^n a_{it}b_{tj} + \sum_{t=1}^n a_{it}c_{tj}.$$

Vzťah  $(B + C)D = BD + CD$  sa overí úplne analogicky.  $\square$

Vidíme, že matica  $I$  má podobnú vlastnosť ako neutrálny prvok nejakej binárnej operácie. Mohla by nám napadnúť otázka, či štvorcové matice náhodou netvoria grupu – už vieme, že násobenie matíc je asociatívne, chýba nám teda ešte inverzný prvok. K otázke existencie inverznej matice sa dostaneme v ďalšej podkapitole.

**Poznámka\* 5.4.9.** Aj tu by sme mohli postupovať tak, že by sme namiesto matíc porovnávali zobrazenia, ktoré zodpovedajú maticiam vystupujúcim v uvedených rovnostiach. (Môžete si to vyskúšať.) Treba si pritom uvedomiť, že zobrazenie zodpovedajúce súčtu matíc je súčet zobrazení a jednotkovej matici zodpovedá identické zobrazenie.

Pri overovaní distributívnosti sa takýmto spôsobom dostanete ku vzťahu medzi sklada- ním zobrazení a súčtom zobrazení, ktoré neplatia všeobecne, platia však pre lineárne zobra- zenia (čo nám úplne stačí).

**Poznámka 5.4.10.** Vektor môžeme chápať ako maticu typu  $1 \times m$ . Vďaka tomu môže mať zmysel aj násobenie matice a vektora.

Nech  $f: F^m \rightarrow F^n$  je lineárne zobrazenie a  $\vec{\alpha} \in F^m$ . Potom platí nasledujúca veľmi užitočná rovnosť

$$f(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha}A_f.$$

Ak  $\vec{\alpha}$  chápeme ako maticu typu  $1 \times m$  nad polom  $F$ , tak uvedená rovnosť skutočne má zmysel – vynásobením matic typu  $1 \times m$  a  $m \times n$  dostaneme maticu typu  $1 \times n$ . Túto maticu môžeme chápať ako vektor z  $F^n$ .

Platnosť uvedenej rovnosti vyplýva priamo z definície násobenia matic. Stačí si uvedomiť, že ak riadky matice  $A$  označíme ako  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_m$ , tak

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}A &= (a_1, \dots, a_m) \begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vdots \\ \vec{\alpha}_m \end{pmatrix} = a_1\vec{\alpha}_1 + \dots + a_m\vec{\alpha}_m = \\ &= a_1f(\vec{\epsilon}_1) + \dots + a_nf(\vec{\epsilon}_n) = f(a_1\vec{\epsilon}_1 + \dots + a_n\vec{\epsilon}_n) = f(a_1, \dots, a_n) = f(\vec{\alpha}). \end{aligned}$$

Všimnime si, že pomocou predchádzajúceho zápisu dostaneme

$$g(f(\vec{\alpha})) = g(\vec{\alpha}A_f) = \vec{\alpha}(A_fA_g),$$

čiže

$$A_{g \circ f} = A_fA_g.$$

Ak si teda zapamätáme, že lineárne zobrazenie je vlastne násobenie maticou *sprava*, tak si ľahko zapamätáme aj to, že sa poradie skladania zobrazení pri súčine matic musí meniť.

**Poznámka 5.4.11.** Z výsledkov v tejto kapitole tiež vidíme, že *každé* lineárne zobrazenie  $f: F^m \rightarrow F^n$  má tvar  $f(\vec{x}) = \vec{x}A$  pre nejakú maticu  $A \in M_{m,n}(F)$ . (Konkrétne to je matica  $A = A_f$ .)

Napríklad pre lineárne zobrazenia  $f: F^2 \rightarrow F^2$  dostávame, že každé takéto zobrazenie bude mať tvar  $f(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha}A$  pre nejakú maticu

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \in M_{2,2}(F).$$

To nám dáva predpis

$$f(x, y) = (x, y) \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = (a_{11}x + a_{21}y, a_{12}x + a_{22}y).$$

Toto je vlastne zovšeobecnenie príkladu 5.3.4.

Súčasne si môžeme všimnúť, že linearitu zobrazenia zadaného takýmto predpisom vieme ľahko overiť aj priamo z definície s využitím vlastností súčinu matic:

$$\begin{aligned} f(\vec{\alpha} + \vec{\beta}) &= (\vec{\alpha} + \vec{\beta})A = \vec{\alpha}A + \vec{\beta}A = f(\vec{\alpha}) + f(\vec{\beta}) \\ f(c\vec{\alpha}) &= (c\vec{\alpha})A = c(\vec{\alpha}A) = cf(\vec{\alpha}) \end{aligned}$$

Ak porovnáte, ako sme zapísali dôkaz linearitu zobrazenia  $f$  teraz (keď už poznáme základné vlastnosti násobenia matic) a ako sme ho zapisovali v príklade 5.3.4, tak by malo byť jasné, že použitie matic nám umožnilo zapísať tento dôkaz stručnejšie a tiež je oveľa prehľadnejší.

V súvislosti so súčinom matic bude pre nás často užitočná aj rovnosť

$$(AB)^T = B^T A^T, \tag{5.1}$$

ktorej dôkaz je ponechaný ako cvičenie (úloha 5.4.1).

## Cvičenia

**Úloha 5.4.1.** Dokážte:

a)  $(AB)^T = B^T A^T$

b) Ak  $A$  je symetrická matica, tak aj  $A^n$  pre každé  $n \in \mathbb{N}$  je symetrická matica.

**Úloha 5.4.2.** Vypočítajte  $A^2 + 2AB + B^2$ ,  $A^2 + 2BA + B^2$ ,  $A^2 + AB + BA + B^2$ ,  $(A + B)^2$ , ak  $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$   $B = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$

**Úloha 5.4.3.** Vyrátajte  $EA$  a  $AE$  pre  $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ -1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$  a a)  $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  b)  $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

c)  $E = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  d)  $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ . Vedeli by ste nájsť riadkovú/stĺpcovú operáciu, pomocou ktorej dostaneme z matice  $A$  maticu  $EA$  resp.  $AE$ ? (Viac sa o súvisi násobenia matíc a elementárnych riadkových/stĺpcových operácií môžete dozvedieť v podkapitole 5.6).

**Úloha 5.4.4.** Pre štvorcovú maticu  $C$  typu  $n \times n$  budeme výraz  $\text{Tr}(C) = \sum_{k=1}^n c_{kk} = c_{11} + c_{22} + \dots + c_{nn}$  nazývať *stopa matice*  $C$ .

Ukážte, že ak  $A, B$  sú matice typu  $n \times n$  nad poľom  $F$ , tak platia rovnosti  $\text{Tr}(A) = \text{Tr}(A^T)$  a  $\text{Tr}(AB) = \text{Tr}(BA)$ .

Zistite, či pre ľubovoľné matice  $A, B, C$  typu  $n \times n$  platia vzťahy  $\text{Tr}(ABC) = \text{Tr}(CBA)$  a  $\text{Tr}(ABC) = \text{Tr}(ACB)$ . (Svoje tvrdenie zdôvodnite!) Ak niektorý z týchto vzťahov neplatí, bude platiť za dodatočného predpokladu, matica  $A$  je symetrická?

**Úloha 5.4.5.** Dokážte, alebo vyvráťte nasledujúce tvrdenie: Ak  $A, B$  sú štvorcové matice typu  $n \times n$  a  $A^2 = B^2$ , tak  $A = B$  alebo  $A = -B$ .

**Úloha 5.4.6.** Nech  $C = AB$ , kde  $A, B$  sú matice. Musí potom platiť  $V_C \subseteq V_A$ ? Musí platiť  $V_C \subseteq V_B$ ? Musí platiť  $V_A \subseteq V_C$ ,  $V_B \subseteq V_C$ ? (Svoje tvrdenie zdôvodnite, t.j. dokážte, alebo nájdite kontrapríklad.)

**Úloha 5.4.7.** Nech  $A, B$  sú matice nad poľom  $F$  typu  $m \times n$  resp.  $n \times k$ . Dokážte, že  $h(AB) \leq h(A)$ . Dokážte, že ak  $n = k$  a  $B$  je regulárna, tak  $h(AB) = h(A)$ .

**Úloha 5.4.8.** Nech  $A, B$  sú matice nad poľom  $F$  typu  $m \times n$  resp.  $n \times k$ . Dokážte, že  $h(AB) \leq h(B)$ . Dokážte, že ak  $m = n$  a  $A$  je regulárna, tak  $h(AB) = h(B)$ .

## 5.5 Inverzná matica

Pripomeňme, že zobrazenie  $g: Y \rightarrow X$  nazývame inverzným zobrazením k zobrazeniu  $f: X \rightarrow Y$ , ak

$$g \circ f = id_X$$

$$f \circ g = id_Y$$

(definícia 2.2.15) a označujeme ho  $f^{-1}$ . Ďalej vieme, že inverzné zobrazenie k zobrazeniu  $f$  existuje práve vtedy, keď  $f$  je bijekcia (tvrdenie 2.2.16).

**Veta 5.5.1.** Ak  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie a existuje inverzné zobrazenie  $f^{-1}: W \rightarrow V$ , tak  $f^{-1}$  je lineárne zobrazenie.



*Dôkaz.* Nech  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in W$ . Označme  $\vec{\alpha}_1 = f^{-1}(\vec{\alpha})$  a  $\vec{\beta}_1 = f^{-1}(\vec{\beta})$ . To znamená, že  $\vec{\alpha}_1, \vec{\beta}_1$  sú (jednoznačne určené) vektory z  $V$ , pre ktoré platí  $f(\vec{\alpha}_1) = \vec{\alpha}$  a  $f(\vec{\beta}_1) = \vec{\beta}$ . Potom (pre ľubovoľné  $c, d \in F$ ) platí

$$f(c\vec{\alpha}_1 + d\vec{\beta}_1) = cf(\vec{\alpha}_1) + df(\vec{\beta}_1) = c\vec{\alpha} + d\vec{\beta}.$$

Zistili sme, že vektor  $c\vec{\alpha}_1 + d\vec{\beta}_1$  sa zobrazením  $f$  zobrazí na vektor  $c\vec{\alpha} + d\vec{\beta}$ , čo znamená

$$f^{-1}(c\vec{\alpha} + d\vec{\beta}) = c\vec{\alpha}_1 + d\vec{\beta}_1.$$

Pretože táto rovnosť platí pre ľubovoľné  $c, d \in F$ , podľa vety 5.3.5 je zobrazenie  $f^{-1}$  lineárne.  $\square$

Vieme, že inverzné zobrazenie existuje iba k bijektívnym zobrazeniam. V prípade, že je zobrazenie  $f$  lineárne, vieme odvodiť pomerne jednoduché kritérium na zistenie či je to bijekcia. Najprv dokážeme lemu, ktorá charakterizuje injektívne a surjektívne lineárne zobrazenia.

**Lema 5.5.2.** *Nech  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie a  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  je báza priestoru  $V$ .*

- (i) *Zobrazenie  $f$  je injekcia práve vtedy, keď vektory  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  sú lineárne nezávislé.*
- (ii) *Zobrazenie  $f$  je surjekcia práve vtedy, keď  $[f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)] = W$  (teda ak vektory  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  generujú celý priestor  $W$ ).*

*Dôkaz časti (i).*  $\Rightarrow$  Nech

$$c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n) = \vec{0}.$$

Z linearity zobrazenia  $f$  dostaneme

$$f(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n) = f(\vec{0}).$$

Pretože  $f$  je prosté, vyplýva z tejto rovnosti

$$c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}$$

a keďže vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  sú lineárne nezávislé, dostávame  $c_1 = \dots = c_n = 0$ . Z rovnosti  $c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n) = \vec{0}$  sme odvodili, že všetky koeficienty vystupujúce v tejto lineárnej kombinácii sú nulové, teda vektory  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  sú skutočne lineárne nezávislé.

$\Leftarrow$  Nech pre nejaké vektory  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in V$  platí  $f(\vec{\alpha}) = f(\vec{\beta})$ . Vektory  $\vec{\alpha}$  a  $\vec{\beta}$  vieme vyjadriť pomocou básových vektorov

$$\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$$

$$\vec{\beta} = d_1\vec{\alpha}_1 + \dots + d_n\vec{\alpha}_n$$

Odčítaním týchto 2 rovností dostaneme  $\vec{\alpha} - \vec{\beta} = (c_1 - d_1)\vec{\alpha}_1 + \dots + (c_n - d_n)\vec{\alpha}_n$ . Ak zobrazíme obe strany tejto rovnosti lineárnym zobrazením  $f$ , dostaneme

$$\vec{0} = f(\vec{\alpha}) - f(\vec{\beta}) = f(\vec{\alpha} - \vec{\beta}) = (c_1 - d_1)f(\vec{\alpha}_1) + \dots + (c_n - d_n)f(\vec{\alpha}_n).$$

Pretože podľa predpokladu sú  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  lineárne nezávislé, vyplýva z toho  $c_i - d_i = 0$ , čo znamená, že  $c_i = d_i$  (pre  $i = 1, 2, \dots, n$ ) a  $\vec{\alpha} = \vec{\beta}$ .

*Dôkaz časti (ii).*  $\Rightarrow$  Inklúzia  $[f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)] \subseteq W$  je zrejma, potrebujeme dokázať obrátenú inklúziu. Nech  $\vec{\alpha}$  je ľubovoľný vektor z  $W$ . Pretože zobrazenie  $f$  je surjektívne,

existuje vektor  $\vec{\beta} \in V$  taký, že  $f(\vec{\beta}) = \vec{\alpha}$ . Vektor  $\vec{\beta}$  sa dá vyjadriť ako lineárna kombinácia bázových vektorov

$$\vec{\beta} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n.$$

Z toho dostaneme

$$\vec{\alpha} = f(\vec{\beta}) = c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n),$$

čo znamená, že  $\vec{\alpha} \in [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)]$ .

$\Leftarrow$  Nech  $\vec{\gamma} \in W = [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)]$ . Potom existujú skaláry  $c_1, \dots, c_n \in F$  také, že

$$\vec{\gamma} = c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n) = f(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n).$$

Našli sme vzor pre ľubovoľný vektor  $\vec{\gamma} \in W$ , čo znamená, že zobrazenie  $f$  je surjektívne.  $\square$

Z predchádzajúcej lemy priamo vyplýva

**Veta 5.5.3.** *Nech  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie a  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  je báza priestoru  $V$ . Zobrazenie  $f$  je bijekcia práve vtedy, keď vektory  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  tvoria bázu vektorového priestoru  $W$ .*

**Dôsledok 5.5.4.** *Nech  $f: F^n \rightarrow F^n$  je lineárne zobrazenie. Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:*

- (i)  $f$  je bijekcia,
- (ii)  $f$  je prosté,
- (iii)  $f$  je surjektívne.

*Dôkaz.* V priestore s dimenziou  $n$  je  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  báza  $\Leftrightarrow$  tieto vektory sú lineárne nezávislé  $\Leftrightarrow [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)] = F^n$  (veta 4.4.14).  $\square$

**Dôsledok 5.5.5.** *Nech  $f: F^n \rightarrow F^n$  je lineárne zobrazenie. Nasledujúce podmienky sú ekvivalentné:*

- (a) zobrazenie  $f$  je bijekcia,
- (b) existuje inverzné zobrazenie  $f^{-1}$ ,
- (c)  $h(A_f) = n$ .

*Dôkaz.* Stačí si uvedomiť, že hodnosť matice je dimenzia priestoru prislúchajúceho tejto matici, čo je v našom prípade celý priestor  $F^n$ .

Obrátene, ak je hodnosť matice  $A_f$  rovná  $n$ , tak jej riadky tvoria  $n$  lineárne nezávislých vektorov v priestore dimenzie  $n$ , sú teda bázou celého priestoru. Riadky matice  $A_f$  sú však práve obrazy vektorov štandardnej bázy.  $\square$

**Definícia 5.5.6.** Nech  $A$  je matica typu  $n \times n$ . Hovoríme, že matica  $B$  je *inverzná* k matici  $A$ , ak platí

$$AB = BA = I_n.$$

Označujeme ju  $B =: A^{-1}$ .

**Poznámka 5.5.7.** Predchádzajúca definícia vlastne hovorí, že  $f_A \circ f_B = f_B \circ f_A = id$ , čiže inverzná matica je práve matica zodpovedajúca inverznému zobrazeniu. Práve tento fakt využijeme pri výpočte inverznej matice – budeme postupovať takým spôsobom, že vypočítame maticu inverzného zobrazenia postup z úlohy 5.3.1. (Čiže začneme s maticou  $(A|I)$  a upravujeme ju kým nedostaneme maticu  $(I|A^{-1})$ .)

**Poznámka 5.5.8.** Je užitočné si uvedomiť, že ak pre štvorcové matice  $A, B$  rovnakých rozmerov platí niektorá z rovností  $AB = I$  alebo  $BA = I$ , tak už  $B$  musí byť inverzná matica k  $A$ .

Aby sme to overili, preložme tieto rovnosti do reči skladania zobrazení. Dostaneme

$$\begin{aligned}f_B \circ f_A &= id \\f_A \circ f_B &= id\end{aligned}$$

Využijeme úlohy 2.2.1 a 2.2.2. V prvom prípade vidíme, že  $f_A$  je injekcia (lebo zložené zobrazenie je injekcia) a podľa dôsledku 5.5.4 je potom  $f_A$  bijekcia. Podobne, v druhom prípade dostaneme, že  $f_A$  je surjekcia, čiže aj bijekcia.

Preto (v oboch prípadoch) má matica  $A$  inverznú maticu  $A^{-1}$ . Ak ňou vynásobíme rovnosť  $AB = I$  zľava, dostaneme  $B = A^{-1}$ . Ak predpokladáme platnosť rovnosti  $BA = I$ , môžeme ju vynásobiť  $A^{-1}$  sprava a opäť máme  $B = A^{-1}$ .

V oboch prípadoch sme dostali rovnosť  $B = A^{-1}$ , čiže pre matice  $n \times n$  stačí overiť jednu z uvedených rovností. (Môže však existovať matica typu  $m \times n$  pre  $m \neq n$  taká, že  $BA = I$ , tá samozrejme nie je inverznou maticou k  $A$ .)

**Definícia 5.5.9.** Štvorcová matica typu  $n \times n$  sa nazýva *regulárna*, ak  $h(A) = n$ .

Z dôsledku 5.5.5 vyplýva nasledujúca veta.

**Veta 5.5.10.** *Nech  $A$  je matica typu  $n \times n$ . K matici  $A$  existuje inverzná matica práve vtedy, keď  $A$  je regulárna.*

Môžeme si všimnúť, že inverznú maticu k súčinu vypočítame ako súčin inverzných matic – treba si však dať pozor na poradie. (Podobne to bolo s transponovanými maticami – úloha 5.4.1.) Toto tvrdenie je analogické k výsledkom o  $(g \circ f)^{-1}$  pri skladaní zobrazení (tvrdenie 5.4.1) a tiež o  $(x * y)^{-1}$  v grupe (veta 3.2.6).

**Tvrdenie 5.5.11.** *Nech  $A, B \in M_{n,n}(F)$  sú regulárne matice. Potom platí:*

- (i)  $(A^{-1})^{-1} = A$ ,
- (ii)  $(A \cdot B)^{-1} = B^{-1} \cdot A^{-1}$
- (iii)  $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$

*Dôkaz.* Úloha 5.5.1. □

**Definícia 5.5.12.** Bijektívne lineárne zobrazenie  $f: V \rightarrow W$  nazývame *izomorfizmus vektorových priestorov*  $V$  a  $W$  (alebo tiež *lineárny izomorfizmus*).

Ak existuje bijektívne zobrazenie  $f: V \rightarrow W$ , hovoríme, že vektorové priestory  $V$  a  $W$  sú izomorfné. Fakt, že  $V$  a  $W$  sú izomorfné označujeme  $V \cong W$ .

**Dôsledok 5.5.13.** *Ak  $V, W$  sú konečnorozmerné vektorové priestory a  $V \cong W$ , tak  $d(V) = d(W)$ .*

*Dôkaz.* Ak  $V$  a  $W$  sú izomorfné, tak existuje bijekcia  $f: V \rightarrow W$ , ktorá je súčasne lineárnym zobrazením.

Označme  $d(V) = n$ . Potom  $V$  má  $n$ -prvkovú bázu  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Podľa vety 5.5.3 je potom  $f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)$  bázou vo  $W$ , čo znamená, že  $d(W) = n$ . □

**Poznámka 5.5.14.** Vieme, že bijektívne zobrazenie je jedno-jednoznačné priradenie medzi prvkami množiny  $V$  a prvkami množiny  $W$ . Ak je toto zobrazenie navyše lineárne, znamená to, že táto jedno-jednoznačná korešpondencia navyše rešpektuje operácie definované na vektorových priestoroch  $V$  a  $W$ .

Fakt, že 2 vektorové priestory sú izomorfné, teda znamená, že sú v podstate rovnaké, len ich prvky sú inak označené (pomenované). Izomorfizmus poskytuje „preklad“ medzi týmito dvoma pomenovaniami.

Nasledujúca veta hovorí, že každý priestor dimenzie  $n$  je izomorfný priestoru  $F^n$ . (A teda každý konečnorozmerný priestor je izomorfný s  $F^n$  pre niektoré  $n$ .)

**Veta 5.5.15.** *Nech  $V$  je vektorový priestor nad poľom  $F$  a  $d(V) = n$ . Potom  $V$  je izomorfný s priestorom  $F^n$ .*

*Dôkaz.* Ak  $d(V) = n$ , znamená to, že  $V$  má  $n$ -prvkovú bázu  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Podľa vety 5.3.7 existuje jediné lineárne zobrazenie  $f: V \rightarrow F^n$  s vlastnosťou  $f(\vec{\alpha}_1) = \vec{\varepsilon}_1, \dots, f(\vec{\alpha}_n) = \vec{\varepsilon}_n$ . Podľa vety 5.5.3 je toto zobrazenie bijekcia, čiže je to izomorfizmus medzi  $V$  a  $F^n$ .  $\square$

### Cvičenia

**Úloha 5.5.1.** Dokážte, že ak  $A, B$  sú regulárne štvorcové matice rovnakých rozmerov nad tým istým poľom  $F$ , tak platí:

- a)  $(A^{-1})^{-1} = A$ ,  
 b)  $(A \cdot B)^{-1} = B^{-1} \cdot A^{-1}$  c)  $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$

**Úloha 5.5.2.** Nájdite inverznú maticu k daným maticiam nad  $\mathbb{R}$ :

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 4 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 2 & 4 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{2} & \sqrt{6} \\ 0 & 1 & \sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ Výsledky:}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{1}{2} \\ -\frac{5}{4} & \frac{1}{4} & \frac{3}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{10} & -\frac{1}{10} \\ -1 & \frac{4}{5} & -\frac{1}{5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 5 & -9 \\ 1 & 1 & -2 \\ -2 & -3 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -1 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{3}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ \frac{3}{2} & -1 & -\frac{1}{2} \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1 & -\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.5.3.** Zistite, či je zadaná matica nad poľom  $\mathbb{Z}_5$  regulárna; ak áno, nájdite inverznú:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 4 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 4 \\ 3 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 4 & 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & 4 & 3 \\ 1 & 3 & 2 & 4 \end{pmatrix},$$

$$\text{Výsledky: } \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 3 \\ 2 & 4 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 2 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 4 & 3 & 3 \\ 3 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 3 \\ 4 & 0 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 2 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.5.4.** Nech  $f: (\mathbb{Z}_5)^4 \rightarrow (\mathbb{Z}_5)^4$  je lineárne zobrazenie také, že  $f(1, 2, 3, 1) = (2, 0, 1, 0)$ ,  $f(0, 2, 3, 1) = (1, 2, 0, 3)$ ,  $f(1, 0, 3, 4) = (3, 2, 1, 0)$ ,  $f(4, 1, 3, 2) = (2, 3, 1, 1)$ . Nájdite maticu zobrazenia  $f^{-1}$ .

**Úloha 5.5.5.** Zistite, či  $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$  je regulárna a) nad  $\mathbb{Z}_2$  b) nad  $\mathbb{Z}_3$ , ak áno, nájdite inverznú.

**Úloha 5.5.6.** Kolko existuje lineárnych zobrazení spĺňajúcich zadané podmienky? Kolko z nich je injektívnych? Kolko je surjektívnych?

- a)  $f: \mathbb{Z}_5^3 \rightarrow \mathbb{Z}_5^4$ ,  $f(1, 3, 1) = (1, 1, 1, 3)$ ,  $f(2, 1, 3) = (0, 1, 3, 4)$ ,  $f(2, 1, 0) = (1, 4, 0, 0)$ ;  
 b)  $f: \mathbb{Z}_5^4 \rightarrow \mathbb{Z}_5^3$ ,  $f(1, 0, 3, 1) = (0, 1, 3)$ ,  $f(2, 1, 3, 1) = (1, 1, 3)$ ,  $f(1, 1, 4, 1) = (2, 2, 1)$ ;  
 c)  $f: \mathbb{Z}_5^4 \rightarrow \mathbb{Z}_5^3$ ,  $f(1, 0, 3, 1) = (0, 1, 3)$ ,  $f(2, 1, 3, 1) = (1, 1, 3)$ ,  $f(1, 1, 0, 0) = (1, 0, 0)$ ;

**Úloha 5.5.7.** Dokážte, alebo nájdite kontrapríklad:

- a) Nech  $A, B, C$  sú štvorcové matice typu  $n \times n$  a platí  $AB = AC$ . Potom  $B = C$ .  
 b) Nech  $A, B, C$  sú štvorcové matice typu  $n \times n$  a platí  $AB = AC$ . Nech navyše  $A$  je regulárna matica. Potom  $B = C$ .

**Úloha 5.5.8.** Zistite, či pre dané matice  $A, B$  nad poľom  $\mathbb{Z}_5$  existuje matica  $X$  nad tým istým poľom taká, že  $AX = B$ . Zistite, či je  $X$  maticami  $A, B$  jednoznačne určená. Ak taká matica existuje, tak aspoň jednu takú maticu nájdite.

$$\begin{aligned} \text{a) } A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} \\ \text{b) } A &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 4 \end{pmatrix} \\ \text{c) } A &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 1 & 4 & 0 \\ 3 & 0 & 3 \end{pmatrix} \\ \text{d) } A &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 4 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \\ 4 & 1 & 3 \end{pmatrix}. \\ \text{e) } A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 3 \\ 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 3 & 2 & 3 \end{pmatrix} \\ \text{f) } A &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 4 \\ 3 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

**Úloha 5.5.9.** Vypočítajte  $A^{-1}B$  a  $B^{-1}A$ . Skúste to urobiť bez výpočtu  $A^{-1}$  resp.  $B^{-1}$ .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 2 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

Ako skúšku správnosti môžete vyskúšať, či po vynásobení výsledku zľava maticou  $A$  (resp.  $B$ ) dostanete maticu  $B$  (resp.  $A$ ).

## 5.6 Elementárne riadkové operácie a súčin matíc

V tejto časti si povieme, ako môžeme elementárne riadkové (stĺpcové) operácie vyjadriť pomocou násobenia matíc.

**Definícia 5.6.1.** Pre ľubovoľnú elementárnu riadkovú operáciu na matici typu  $m \times n$  nazveme *maticou elementárnej riadkovej operácie* maticu typu  $m \times m$ , ktorá vznikne vykonaním tejto operácie na jednotkovej matici  $I_m$ .

Podobne môžeme definovať maticu stĺpcovej operácie.

**Príklad 5.6.2.** Uvažujme matice s 3 riadkami. Potom výmene prvého a tretieho riadku zodpovedá matica  $E_1$ , pripočítaniu dvojnásobku druhého riadku k prvému matica  $E_2$  a vynásobeniu prvého riadku číslom 3 matica  $E_3$ .

$$E_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad E_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E_3 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Vedeli by ste nájsť stĺpcové operácie, ktorým by zodpovedali tieto 3 matice? (Odpoveď: Výmena prvého a tretieho stĺpca, pripočítanie 2-násobku prvého stĺpca k druhému a vynásobenie prvého stĺpca číslom 3.)

**Tvrdenie 5.6.3.** Ak matica  $B$  vznikne z matice  $A$  vykonaním nejakej elementárnej riadkovej operácie a  $E$  je matica tejto riadkovej operácie, tak  $B = EA$ .

**Príklad 5.6.4.** Ak  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$  a  $E_2$  je matica z predchádzajúceho príkladu, tak  $E_2A = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$  je skutočne matica, ktorá vznikne z  $A$  pripočítaním dvojnásobku druhého riadku k prvému.

*Dôkaz.* Tvrdenie overíme jednoducho priamym výpočtom. Budeme postupovať pre každý typ elementárnej riadkovej operácie zvlášť.

Nech  $A = ||a_{ij}||$  je matica typu  $m \times n$ .

Výmene  $k$ -teho a  $l$ -teho riadku zodpovedá matica  $E = ||e_{ij}||$ , ktorej prvky sú len nuly a jednotky, pričom jednotky sú iba na pozíciách  $e_{ii}$  pre  $i \neq k, l$  a tiež  $e_{kl}$  a  $e_{lk}$ . Vidíme, že v súčine  $EA$  budú všetky riadky okrem  $k$ -teho a  $l$ -teho rovnaké ako v matici  $A$ . (Vo výraze  $\sum_{t=1}^m e_{it}a_{tj}$  jediný nenulový sčítanec je  $e_{ii}a_{ij} = a_{ij}$ .) Podobne v  $k$ -tom riadku dostaneme prvky  $l$ -teho riadku a obrátene.

$$\sum_{t=1}^m e_{kt}a_{tj} = e_{kl}a_{lj} = a_{lj},$$

$$\sum_{t=1}^m e_{lt}a_{tj} = e_{lk}a_{kj} = a_{kj}.$$

Matica  $EA$  je teda skutočne matica, ktorá vznikne výmenou týchto 2 riadkov.

Vynásobeniu  $k$ -teho riadku skalárom  $c$  zodpovedá matica  $E$ , ktorá má mimo diagonály nuly a na diagonále jednotky s výnimkou prvkov  $e_{kk} = c$ . Opäť sa nezmenia ostatné riadky a v  $k$ -tom riadku dostávame

$$\sum_{t=1}^m e_{kt}a_{tj} = e_{kk}a_{kj} = ca_{kj}.$$

Teda  $k$ -ty riadok novej matice je skutočne  $c$ -násobok  $k$ -teho riadku pôvodnej matice.

Teraz uvažujme pripočítanie  $c$ -násobku  $l$ -teho riadku ku  $k$ -temu. V tomto prípade má matica  $E$  na diagonále jednotky a mimo diagonály je jediný nenulový prvok  $e_{kl} = c$ . Opäť vidno, že mimo  $k$ -teho riadku sa prvky nezmenia. V  $k$ -tom riadku dostaneme

$$\sum_{t=1}^m e_{kt}a_{tj} = e_{kk}a_{kj} + e_{kl}a_{lj} = a_{kj} + ca_{lj}.$$

Teda  $k$ -ty riadok matice  $EA$  je skutočne súčet  $k$ -teho riadku matice  $A$  a  $c$ -násobku  $l$ -teho riadku matice  $A$ .  $\square$

Úplne analogicky sa dá dokázať podobné tvrdenie pre stĺpcové operácie.

**Tvrdenie 5.6.5.** Ak matica  $B$  vznikne z matice  $A$  vykonaním nejakej elementárnej stĺpcovej operácie a  $E$  je matica tejto stĺpcovej operácie, tak  $B = AE$ .

Užitočné je si všimnúť, že matica ľubovoľnej elementárnej riadkovej operácie je regulárna a inverzná matica k nej je tiež matica elementárnej riadkovej operácie. (Dalo by sa povedať, že je to matica „inverznej“ riadkovej operácie – pozri poznámku 5.2.6. Práve fakt, že elementárne riadkové operácie sú invertovateľné môžeme použiť ako jednu z možností na zdôvodnenie, že matice elementárnych riadkových operácií sú regulárne.)

**Poznámka 5.6.6.** Ak  $A$  je ľubovoľná matica, tak pomocou elementárnych riadkových operácií z nej vieme dostať redukovanú trojuholníkovú maticu

$$R = E_1E_2 \dots E_kA.$$

Potom platí

$$A = E_k^{-1} \dots E_2^{-1} E_1^{-1} R.$$

Takto sme maticu  $A$  vyjadrili ako súčin pomerne jednoduchých matíc (jedna z nich je v redukovanom trojuholníkovom tvare, ostatné sú matice elementárnych riadkových operácií). To môže byť užitočné v dôkazoch niektorých tvrdení – hlavne v prípade, že dokazované tvrdenie vieme ľahko dokázať pre matice takéhoto tvaru a tiež vieme dokázať, že platnosť tvrdenia sa zachová ak prejdeme k súčinu matíc.

Ilustráciou tohoto prístupu je napríklad alternatívny dôkaz vety 5.7.2.

Pomocou tohoto vzťahu medzi násobením matíc a môžeme lepšie porozumieť spôsobu, akým sme počítali inverzné matice.

Začali sme s maticou

$$(A|I)$$

a v každom kroku sme urobili nejakú riadkovú operáciu, ktorá zodpovedá vynásobeniu oboch častí matice zľava nejakou maticou riadkovej operácie.

$$(A|I) \sim (E_1 A | E_1 I) \sim (E_2 E_1 A | E_2 E_1 I) \sim \dots \sim (E_n \dots E_2 E_1 A | E_n \dots E_2 E_1 I) = (I|E),$$

kde ako  $E$  sme označili maticu  $E := E_n \dots E_2 E_1$ . Pretože táto matica spĺňa rovnosť  $EA = I$  (túto rovnosť vidíme z ľavej časti matice), je to inverzná matica k  $A$ . Tiež si môžeme všimnúť, že v každom kroku dostaneme maticu tvaru  $(DA|D)$ , t.j. ak vynásobíme pravú časť sprava maticou  $A$ , dostaneme ľavú časť matice.

Podobne sa dá pozeráť aj na riešenie sústav lineárnych rovníc, ktorými sa budeme zaoberať v nasledujúcej kapitole.

Takisto pri výpočte matice zobrazenia sme mali zadaných viacero podmienok tvaru  $\vec{\beta}_i A = \vec{\gamma}_i$ . Ak poukladáme vektory  $\vec{\beta}_i$  do matice  $B$  ako riadky a podobne z vektorov  $\vec{\gamma}_i$  vytvoríme maticu  $C$ , tieto podmienky môžeme zapísať ako jedinú maticovú rovnosť

$$BA = C.$$

Pri výpočte sme postupovali tak, že sme maticu  $C$  zľava násobili nejakými maticami riadkových operácií, a to konkrétne takými, že z matice  $B$  vytvoria jednotkovú maticu, čiže ich súčin je matica  $I$ .

To znamená, že  $A = B^{-1}C$  (ak  $B$  je regulárna) alebo presnejšie,  $A = B'C$ , kde  $B'$  je taká matica, že  $B'B = I$ .

**Poznámka 5.6.7.** Ďalší užitočný fakt, ktorý by nám mal byť po prečítaní tejto kapitoly jasný, je, že násobenie maticou  $A$  zľava zodpovedá vytvoreniu lineárnych kombinácií riadkov v matici  $B$  (riadky matice  $A$  určujú koeficienty).

Podobne, ak maticu  $B$  násobíme maticou  $A$  sprava, tak stĺpce v  $BA$  budú lineárne kombinácie stĺpcov  $B$  s koeficientmi určenými stĺpcami matice  $A$ .

(Videli sme, že niečo takéto platí pre matice riadkových operácií. Priamo z definície násobenia matíc sa dá overiť, že to platí aj pre ľubovoľné matice.)

### Cvičenia

**Úloha 5.6.1\***. Nech  $A, B \in M_{m,n}(F)$ . Dokážte: Matice  $A, B$  sú riadkovo ekvivalentné práve vtedy, keď existuje regulárna matica  $R \in M_{m,m}(F)$  taká, že  $B = RA$ .

**Úloha 5.6.2\***. Nech  $A$  je štvorcová matica (nad nejakým poľom  $F$ ). Dokážte: Matica  $A$  je regulárna práve vtedy, keď  $A$  sa dá dostať ako súčin nejakých matíc elementárnych riadkových operácií. (T.j.  $A = E_1 E_2 \dots E_k$ , kde každá z matíc  $E_1, E_2, \dots, E_k$  zodpovedá nejakej ERO.)

## 5.7 Sústavy lineárnych rovníc

**Definícia 5.7.1.** *Sústavou lineárnych rovníc* rozumieme systém rovníc tvaru

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= c_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= c_2 \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= c_m \end{aligned} \tag{5.2}$$

kde  $a_{ij}, c_i \in F$  pre všetky prípustné hodnoty indexov  $i$  a  $j$ .

*Riešenie* sústavy lineárnych rovníc je  $n$ -ticia  $(x_1, \dots, x_n)$  ktorá spĺňa všetky uvedené rovnice. Ak existuje aspoň jedno riešenie sústavy lineárnych rovníc, hovoríme, že táto sústava je *riešiteľná*. Skaláry  $c_1, \dots, c_n$  nazývame *pravé strany*,  $a_{ij}$  sú *koefficienty* a  $x_i$  sú *neznáme*.

Maticu

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

nazývame *matica sústavy* (5.2).

Maticu

$$A' = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & c_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & c_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & c_m \end{pmatrix}$$

nazývame *rozšírená matica sústavy* (5.2).

Pomocou matice sústavy môžeme zdefinovať *maticový zápis* sústavy

$$A\vec{x}^T = \vec{c}^T$$

alebo

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}$$

Skutočne,  $(x_1, \dots, x_n)$  je riešením sústavy (5.2) práve vtedy, keď platí uvedená maticová rovnosť.

**Veta 5.7.2.** *Ak rozšírené matice dvoch sústav lineárnych rovníc sú riadkovo ekvivalentné, tak tieto dve sústavy majú rovnakú množinu riešení.*

*Dôkaz.* Predpokladajme, že z rozšírenej matice sústavy  $(A|c)$  sme dostali nejakou elementárnou riadkovou operáciou maticu  $(B|d)$ . Vďaka tomu, že elementárne riadkové operácie sú invertibilné (t.j. možno ich obrátiť, pozri poznámku 5.2.6) stačí nám dokázať, že každé riešenie sústavy  $(A|c)$  je aj riešením sústavy  $(B|d)$ .

Výmena riadkov je vlastne výmena 2 rovníc, čo samozrejme neovplyvní, či  $(x_1, \dots, x_n)$  je riešením sústavy.

Ak prenásobíme  $i$ -ty riadok skalárom  $c \neq 0$ , znamená to, že z rovnice  $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n = c_i$  dostaneme rovnicu  $ca_{i1}x_1 + ca_{i2}x_2 + \dots + ca_{in}x_n = cc_i$ . Pretože druhá rovnica je



$c$ -násobkom prvej, je jasné, že ak  $x_1, x_2, \dots, x_n$  spĺňa prvú uvedenú rovnicu, musí spĺňať aj druhú z nich.

Zostáva nám posledný typ elementárnych riadkových úprav. Predpokladajme, že sme novú maticu získali pripočítaním  $c$ -násobku  $j$ -teho riadka k  $i$ -temu riadku. To znamená, že  $i$ -ta rovnica sústavy sa zmenila na rovnicu

$$(a_{i1} + ca_{j1})x_1 + (a_{i2} + ca_{j2})x_2 + \dots + (a_{in} + ca_{jn})x_n = c_i + cc_j.$$

Ak však  $x_1, \dots, x_n$  spĺňa rovnosť  $a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n = c_j$ , tak spĺňa aj jej  $c$ -násobok  $ca_{j1}x_1 + ca_{j2}x_2 + \dots + ca_{jn}x_n = cc_j$ . Sčítaním tejto rovnice a rovnice  $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n = c_i$  dostaneme práve  $i$ -ty riadok novej sústavy. Pretože  $x_1, \dots, x_n$  spĺňa obe uvedené rovnice, musí spĺňať aj rovnicu, ktorú dostaneme ich sčítaním.  $\square$

Pomocou toho, čo sme sa dozvedeli o súvisi elementárnych riadkových úprav s násobením matic v časti 5.6 môžeme dokázať tú istú vetu aj iným spôsobom, ktorý je snáď do istej miery jasnejší (alebo prinajmenšom stručnejšie zapísaný – lebo hovorí to isté, čo predchádzajúci dôkaz, iba používa trochu iný pohľad na elementárne riadkové operácie).

*Dôkaz.* Označme maticu uvažovanej elementárnej riadkovej operácie  $E$ . Uvedomme si najprv, že urobiť elementárnu riadkovú úpravu na rozšírenej matici sústavy je presne to isté, ako keby sme túto úpravu urobili zvlášť na matici  $A$  a zvlášť na stĺpcovom vektore  $\vec{c}^T$ . To znamená, že ak pôvodná sústava bola (pri zápise v maticovom tvare)  $A\vec{x}^T = \vec{c}^T$ , tak po úprave dostaneme.

$$EA\vec{x}^T = E\vec{c}^T.$$

Z toho vidíme, že každé riešenie pôvodnej sústavy je aj riešením sústavy s upravenou maticou (obe strany rovnosti sme vynásobili zľava tou istou maticou  $E$ , tým sme nezmenili platnosť rovnosti).

Obrátene, ak pre  $\vec{x}$  platí  $EA\vec{x}^T = E\vec{c}^T$ , tak prenásobením tejto rovnosti maticou  $E^{-1}$  zľava dostaneme, že  $\vec{x}$  je aj riešením pôvodnej sústavy.  $\square$

### 5.7.1 Homogénne sústavy lineárnych rovníc

V prípade, že pravé strany sú nulové ( $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$ ), nazývame sústavu (5.2) *homogénna* sústava lineárnych rovníc. Lahko si môžeme všimnúť, že v prípade homogénnej sústavy je nulový vektor  $(0, 0, \dots, 0)$  riešením sústavy. Toto riešenie nazývame *triviálne riešenie*.

**Veta 5.7.3.** *Množina všetkých riešení homogénnej sústavy lineárnych rovníc tvorí podpriestor priestoru  $F^n$ .*

*Dôkaz.* Stačí overiť vlastnosti z definície podpriestoru.

Ak  $\vec{\alpha}$  a  $\vec{\beta}$  sú riešeniami homogénnej sústavy s maticou  $A$ , znamená to, že  $A\vec{\alpha}^T = \vec{0}^T$  a  $A\vec{\beta}^T = \vec{0}^T$ .

Sčítaním týchto rovností dostaneme  $A(\vec{\alpha} + \vec{\beta})^T = \vec{0}^T$ , teda aj  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}$  je riešením tejto sústavy. Ak prvú rovnosť vynásobíme skalárom  $F$ , máme  $A(c\vec{\alpha})^T = \vec{0}^T$ , čo znamená, že aj  $c\vec{\alpha}$  je riešením sústavy.  $\square$

Rozšírenú maticu sústavy lineárnych rovníc môžeme teda upraviť na redukovanú trojuholníkovú maticu. Predpokladajme, že sme navyše preusporiadali premenné (čo vlastne zodpovedá permutácii niektorých stĺpcov) tak, aby vo výslednej matici boli ako prvé tie stĺpce,

kde vystupujú vedúce jednotky. Navyše môžeme vynechať všetky nulové riadky bez toho, aby sme nejako ovplyvnili množinu riešení. Dostaneme takto maticu, ktorej zodpovedá sústava

$$\begin{aligned} x_1 + c_{1,r+1}x_{r+1} + c_{1,r+2}x_{r+2} + \dots + c_{1,n}x_n &= 0 \\ x_2 + c_{2,r+1}x_{r+1} + c_{2,r+2}x_{r+2} + \dots + c_{2,n}x_n &= 0 \\ &\dots \\ x_r + c_{r,r+1}x_{r+1} + c_{r,r+2}x_{r+2} + \dots + c_{r,n}x_n &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

pričom  $r$  označuje hodnotú pôvodnej matice (a teda aj matice  $C$ ).

Vidíme, že ak si zvolíme hodnotu neznámych  $x_{r+1}, x_{r+2}, \dots, x_n$ , dá sa z týchto rovníc dorátať hodnota neznámych  $x_1, x_2, \dots, x_r$ . Ak postupne dosadíme 1 za  $x_{r+k}$  a 0 za ostatné neznáme, ktoré si môžeme voliť (pre  $k = 1, 2, \dots, n - r$ ) dostaneme tieto riešenia sústavy (5.3):

$$\begin{aligned} \vec{\gamma}_{r+1} &= (-c_{1,r+1}, -c_{2,r+1}, \dots, -c_{r,r+1}, 1, 0, \dots, 0), \\ \vec{\gamma}_{r+2} &= (-c_{1,r+2}, -c_{2,r+2}, \dots, -c_{r,r+2}, 0, 1, \dots, 0), \\ &\dots \\ \vec{\gamma}_n &= (-c_{1,n}, -c_{2,n}, \dots, -c_{r,n}, 0, \dots, 0, 1). \end{aligned} \quad (5.4)$$

**Veta 5.7.4.** *Vektory  $\vec{\gamma}_{r+1}, \vec{\gamma}_{r+2}, \dots, \vec{\gamma}_n$  tvoria bázu priestoru riešení homogénnej sústavy (5.3).*

*Dôkaz.* Z toho, ako sme ich získali, vieme, že tieto vektory sú riešenia (5.3).

Ich lineárnu nezávislosť overíme tiež pomerne jednoducho: ak

$$\vec{\alpha} = d_{r+1}\vec{\gamma}_{r+1} + d_{r+2}\vec{\gamma}_{r+2} + \dots + d_n\vec{\gamma}_n = \vec{0}$$

tak vektor  $\vec{\alpha}$  má na  $(r+k)$ -tej súradnici hodnotu  $d_{r+k}$ , z čoho dostaneme  $d_{r+k} = 0$  pre  $k = 1, 2, \dots, n - r$ .

Zostáva dokázať, že vektory  $\vec{\gamma}_{r+1}, \vec{\gamma}_{r+2}, \dots, \vec{\gamma}_n$  generujú celý priestor riešení, teda že každé riešenie homogénnej sústavy (5.3) možno získať ako ich lineárnu kombináciu.

Nech teda  $b_1, b_2, \dots, b_n$  je riešením (5.3). Z toho dostaneme

$$b_i = -c_{i,r+1}b_{r+1} - c_{i,r+2}b_{r+2} - \dots - c_{i,n}b_n$$

pre  $i = 1, 2, \dots, r$ . Z týchto rovností priamo vyplýva

$$\vec{\beta} = b_{r+1}\vec{\gamma}_{r+1} + b_{r+2}\vec{\gamma}_{r+2} + \dots + b_n\vec{\gamma}_n,$$

teda vektor  $\vec{\beta}$  je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\gamma}_{r+1}, \vec{\gamma}_{r+2}, \dots, \vec{\gamma}_n$ . □

**Dôsledok 5.7.5.** *Nech  $A$  je matica typu  $m \times n$  a  $S$  je priestor riešení homogénnej sústavy lineárnych rovníc s maticou  $A$ . Potom*

$$d(S) = n - h(A).$$

**Poznámka 5.7.6.** V skutočnosti sme vlastne dôsledok 5.7.5 zatiaľ dokázali iba v špeciálnom prípade, že sú premenné (resp. stĺpce našej matice) vhodne usporiadané. V celom dôkaze vety 5.7.4 sme totiž predpokladali, že premenné sú usporiadané tak, aby výsledná redukovaná trojuholníková matica mala vedúce jednotky na začiatku.

Môžeme si však uvedomiť, že presne rovnaký dôkaz by fungoval aj bez výmeny premenných; len by ho bolo o dosť ťažšie formálne zapísať. Všetky výpočty v tomto dôkaze totiž robíme po súradniciach.

Iný možný pohľad je uvedomiť si, že permutácia súradníc predstavuje izomorfizmus  $F^n \rightarrow F^n$ . Aj ak zúžime toto zobrazenie na nejaký podpriestor, tak dostaneme opäť izomorfizmus medzi dvoma podpriestormi. (V tomto prípade podpriestorom riešení pôvodnej sústavy a podpriestorom riešení sústavy s vymenenými premennými.) Izomorfizmus zachováva dimenziu priestoru.

**Dôsledok 5.7.7.** *Homogénna sústava lineárnych rovníc s  $n$  neznámymi, ktorej matica má hodnotu  $n$ , má len triviálne riešenie.*

Ilustrujme si predchádzajúci postup na dvoch veľmi jednoduchých príkladoch homogénnych sústav lineárnych rovníc nad  $\mathbb{R}$ .

**Príklad 5.7.8.**  $\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}\right) \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}\right) \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right) \sim \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}\right)$

V tomto prípade nám nezostali žiadne premenné, ktoré by sme mohli voliť – vo všetkých stĺpcoch máme vedúce jednotky. Prepísaním sústavy z maticového zápisu priamo dostaneme (ako jediné možné riešenie) triviálne riešenie  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = 0$ .

**Poznámka 5.7.9.** Všimnime si, že na pravej strane pri všetkých elementárnych riadkových úpravách zostávajú nulové. Kvôli stručnejšiemu zápisu, pri riešení homogénnych sústav budeme vynechávať pravej strane a budeme namiesto rozšírenej matice sústavy písať len maticu sústavy. (Budeme si pamätať, že pravej strane sú nuly, ale nebudeme ich po každom kroku znovu písať.)

**Príklad 5.7.10.** Vynechajme teraz z predchádzajúcej sústavy jednu rovnicu. Úpravou na redukovanú trojuholníkovú maticu dostaneme

$$\left(\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{array}\right) \sim \left(\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{array}\right)$$

Vidíme, že sústava je ekvivalentná so sústavou  $x_1 + x_3 = 0$  a  $x_2 = 0$ . Premennú  $x_3$  môžeme voliť (v treťom stĺpci nie je vedúca jednotka). Nech teda  $x_3 = t$ , kde  $t \in \mathbb{R}$  je parameter. Keď z predchádzajúcich rovníc vyjadríme  $x_1$  a  $x_2$ , máme  $x_1 = -t$  a  $x_2 = 0$ . Množina riešení tejto sústavy je teda  $\{(t, 0, -t); t \in \mathbb{R}\}$ .

Lahko môžeme overiť, že množina riešení je skutočne podpriestor priestoru  $\mathbb{R}^3$ . Pretože každý vektor z množiny riešení má tvar  $t \cdot (1, 0, -1)$ , môžeme ju zapísať aj ako  $\{(t, 0, -t); t \in \mathbb{R}\} = [(1, 0, -1)]$ .

Aj postup riešenia nehomogénnych sústav je veľmi podobný – podrobnejšie ho rozoberieme v nasledujúcej podkapitole. Predtým však ešte dokážeme vetu, ktorú môžeme chápať ako obrátenie vety 5.7.3.

**Veta 5.7.11.** *Každý podpriestor priestoru  $F^n$  je množinou riešení nejakého homogénneho systému lineárnych rovníc.*

*Dôkaz.* Ak  $S$  je podpriestor  $F^n$ , tak  $S$  je konečnorozmerný (veta 4.4.17). Má teda konečnú bázu  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r$ .

Nech  $B$  je matica, ktorej riadky tvoria vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r$ ,

$$B = \begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vdots \\ \vec{\alpha}_r \end{pmatrix}.$$

Podľa predchádzajúcej vety má podpriestor riešení homogénnej sústavy

$$B \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \vec{0}^T$$

bázu  $\vec{\gamma}_{r+1}, \dots, \vec{\gamma}_n$ .

Označme ako  $A$  maticu, ktorej riadkami sú vektory  $\vec{\gamma}_{r+1}, \dots, \vec{\gamma}_n$ ,

$$A = \begin{pmatrix} \vec{\gamma}_{r+1} \\ \vdots \\ \vec{\gamma}_n \end{pmatrix}.$$

Pretože každý vektor  $\vec{\gamma}_i$  je riešením sústavy s maticou  $B$ , platí  $B \cdot \vec{\gamma}_i^T = \vec{0}^T$ . Z toho dostaneme

$$B \cdot A^T = 0$$

(treba si uvedomiť, že  $i$ -ty stĺpec matice  $A$  je  $\vec{\gamma}_i^T$ , z čoho vyplýva, že stĺpce matice  $B \cdot A^T$  môžeme vypočítať ako  $B \cdot \vec{\gamma}_i^T$ ). Transponovaním predchádzajúceho vzťahu dostaneme (na základe (5.1))

$$A \cdot B^T = 0.$$

Keď porovnáme  $i$ -ty stĺpec matice na ľavej a pravej strane predchádzajúcej rovnosti, dostaneme

$$A \vec{\alpha}_i^T = \vec{0}^T,$$

teda vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r$  sú riešeniami homogénnej sústavy  $A \vec{x}^T = \vec{0}^T$ .

Označme ako  $M$  priestor riešení tejto sústavy. Jeho dimenzia je

$$d(M) = n - h(A) = n - (n - r) = r.$$

Súčasne platí  $S \subseteq M$  (pretože všetky vektory  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r$  patria do  $M$ ) a  $d(S) = d(M)$ , teda podľa tvrdenia 4.4.18 platí  $S = M$ .  $\square$

### 5.7.2 Gaussova eliminačná metóda

*Gaussovou eliminačnou metódou* nazývame algoritmus na riešenie sústav lineárnych rovníc, o ktorom sme hovorili v predchádzajúcej kapitole. Ide teda o postup, pri ktorom rozšírenú maticu sústavy najprv upravíme na redukovanú trojuholníkovú maticu a z nej už potom vieme zistiť riešenie pôvodnej sústavy.

V prípade, že počas úprav dostaneme riadok tvaru  $(0 \dots 0 | c)$ , kde  $c \neq 0$ , sústava nemá riešenie. (Takýto riadok zodpovedá rovnici  $0x_1 + \dots + 0x_n = c$ .) V takomto prípade samozrejme nemusíme ďalej pokračovať v upravovaní na RTM.

Ak niektoré stĺpce (v upravenej matici) neobsahujú vedúcu jednotku, tak im prislúchajúce premenné zvolíme za parametre.

Ukážeme si tento postup na niekoľkých jednoduchých príkladoch. V prípade homogénnych sústav sme mali dve možnosti – buď existovalo jediné riešenie (pri homogénnej sústave to bolo triviálne riešenie) alebo riešení bolo viac (tvorili podpriestor). Pri nehomogénnej sústave lineárnych rovníc už množina riešení netvorí vektorový podpriestor a navyše pribudne ešte ďalšia možnosť – môže sa stať, že sústava nemá nijaké riešenie.

**Príklad 5.7.12.** Riešme sústavu

$$\begin{array}{cccccc} x_1 & -2x_2 & +3x_3 & -4x_4 & = & 4 \\ & x_2 & -x_3 & +x_4 & = & -3 \\ x_1 & +3x_2 & & -3x_4 & = & 1 \\ & -7x_2 & +3x_3 & +x_4 & = & -3 \end{array}$$

nad polom  $\mathbb{R}$ .

Danú sústavu najprv prepíšeme do matice a potom upravujeme rozšírenú maticu sústavy až kým nedostaneme redukovaný trojuholníkový tvar.

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & -3 \\ 1 & 3 & 0 & -3 & | & 1 \\ 0 & -7 & 3 & 1 & | & -3 \end{pmatrix} \stackrel{(1)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & -3 \\ 0 & 5 & -3 & 1 & | & -3 \\ 0 & -7 & 3 & 1 & | & -3 \end{pmatrix} \stackrel{(2)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & -3 \\ 0 & 0 & 2 & -4 & | & 12 \\ 0 & 0 & -4 & 8 & | & -24 \end{pmatrix} \stackrel{(3)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & -3 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & | & 6 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & | & 6 \end{pmatrix}$$

$$\stackrel{(4)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & | & -3 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & | & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \stackrel{(5)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & | & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & | & -3 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & | & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \stackrel{(6)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & | & -8 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & | & 3 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & | & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix}$$

(1)  $3 \cdot r - 1 \cdot r$  (Týmto zápisom myslím to, že od tretieho riadku sa odčíta prvý.)

(2)  $3 \cdot r - 5 \cdot 2 \cdot r$ ;  $4 \cdot r + 7 \cdot 1 \cdot r$

(3)  $3 \cdot r * = 1/2$ ;  $4 \cdot r * = -1/4$

(4)  $3 \cdot r - 4 \cdot r$

(5)  $2 \cdot r + 3 \cdot r$

(6)  $1 \cdot r + 2 \cdot 2 \cdot r - 3 \cdot 3 \cdot r$

Štvrtý stĺpec neobsahuje vedúcu jednotku. Preto  $x_4$  zvolíme za parameter - položíme  $x_4 = t$ . Dostaneme potom  $x_1 = -8$ ,  $x_2 = t + 3$ ,  $x_3 = 2t + 6$ . Množina všetkých riešení je teda  $\{(-8, 3 + t, 6 + 2t, t); t \in \mathbb{R}\}$ .

(Ak by bola vedúca jednotka v každom stĺpci redukovanej trojuholníkovej matice, ktorú sme dostali z matice sústavy, mali by sme situáciu ešte jednoduchšiu - dostali by sme jediné riešenie. Jedine v prípade, že by bola vedúca jednotka aj v stĺpci pravých strán, čo zodpovedá rovnici  $0 = 1$ , by sústava nemala žiadne riešenie.)

Skúšku správnosti urobíme tak, že dosadíme výsledok do pôvodnej sústavy. V prípade, že v riešení vystupuje parameter, buď dosadíme výsledok aj s parametrom, alebo to vyskúšame pre nejaké dve hodnoty parametra (také, aby sa nám dobre rátalo). Ak je parametrov viac, môžeme napríklad zvoliť najprv všetky parametre za nulu (tým skontrolujeme riešenie nehomogénneho systému) a potom vždy jeden z parametrov položíme rovný 1 a ostatné 0.

Úpravu, v ktorej sme spravili chybu, môžeme nájsť tak, že skúsime, pre ktoré z matíc získaných počas upravovania náš výsledok ešte vyhovuje a pre ktoré už nie. (Ak nejaká  $n$ -tica  $(x_1, \dots, x_n)$  vyhovuje sústave, ktorú sme dostali v jednom kroku alebo sústave v nasledujúcom kroku už nevyhovuje (alebo je to obrátene), táto úprava musí byť chybná. Vyplýva to z toho, že elementárne riadkové operácie nemenia množinu riešení.)

**Príklad 5.7.13.** Riešme v  $\mathbb{Z}_5$  určenú maticou

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 0 & | & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 4 & | & 3 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & | & 4 \end{pmatrix}$$

$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 0 & | & 2 \\ 0 & 1 & 3 & 4 & | & 3 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & | & 4 \end{pmatrix} \stackrel{(1)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 1 & 4 & 4 & 0 & | & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 4 & | & 3 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & | & 4 \end{pmatrix} \stackrel{(2)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 1 & 4 & 4 & 0 & | & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 4 & | & 3 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & | & 4 \end{pmatrix} \stackrel{(3)}{\sim} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & | & 1 \\ 1 & 4 & 4 & 0 & | & 1 \\ 0 & 1 & 3 & 4 & | & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 2 \end{pmatrix}$

(1)  $2 \cdot r + 4 \cdot 1 \cdot r$  (2)  $3 \cdot r + 4 \cdot 2 \cdot r$  (3)  $4 \cdot r + 4 \cdot 3 \cdot r$  (Kvôli stručnosti a prehľadnosti som v matici vynechával nulové koeficienty.)

Pretože sme dostali riadok zodpovedajúci rovnici  $0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 = 2$ , sústava nemá riešenie.

### 5.7.3 Frobeniova veta

V tejto časti dokážeme vetu, ktorá poskytuje kritérium na riešiteľnosť nehomogénnych sústav lineárnych rovníc. Predtým však potrebujeme ukázať, že hodnosť matice je rovnaká ako hodnosť transponovanej matice. (Túto vetu neskôr ešte dokážeme dvoma odlišnými spôsobmi v časti 5.9.)

**Veta 5.7.14.** *Pre každú maticu  $A$  nad poľom  $F$  platí  $h(A) = h(A^T)$ .*

*Dôkaz.* Nech  $A$  je matica typu  $m \times n$ .

Ak označíme  $i$ -ty stĺpec matice  $A$  ako  $\vec{\alpha}_i$ , tak platí

$$h(A^T) = d[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n].$$

Bez toho, aby sme zmenili hodnosť, môžeme preusporiadať stĺpce matice tak, aby po úprave na redukovanú trojuholníkovú maticu boli vedúce jednotky v prvých  $r$  stĺpcoch, kde  $r = h(A)$ .

Budeme sa zaoberať riešeniami homogénnej sústavy

$$A\vec{x}^T = \vec{0}^T,$$

ktorú môžeme ekvivalentne prepísať ako

$$x_1\vec{\alpha}_1 + \dots + x_n\vec{\alpha}_n = \vec{0}. \quad (5.5)$$

(Rozmyslite si prečo – vyplýva to priamo z definície súčiny matíc.)

Všetky riešenia tejto sústavy sú určené bázou (5.4). Špeciálne z toho, že

$$\vec{\gamma}_i = (-c_{1,i}, -c_{2,i}, \dots, -c_{r,i}, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$$

(kde  $i \in \{r+1, r+2, \dots, n\}$ ) je riešením (5.5), vyplýva

$$\begin{aligned} -c_{1,i}\vec{\alpha}_1 - c_{2,i}\vec{\alpha}_2 - \dots - c_{r,i}\vec{\alpha}_r + \vec{\alpha}_i &= \vec{0}, \\ \vec{\alpha}_i &= c_{1,i}\vec{\alpha}_1 + c_{2,i}\vec{\alpha}_2 + \dots + c_{r,i}\vec{\alpha}_r, \end{aligned}$$

a teda  $\vec{\alpha}_i$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r$  pre všetky  $i = r+1, r+2, \dots, n$ .

Teda

$$[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_r]$$

a

$$h(A^T) = d([\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]) \leq r,$$

čo znamená, že

$$h(A) \geq h(A^T).$$

Použitím tejto nerovnosti pre maticu  $A^T$  však dostaneme

$$h(A^T) \geq h((A^T)^T) = h(A),$$

a teda  $h(A^T) = h(A)$ . □

**Poznámka 5.7.15.** Pretože vykonanie riadkovej operácie na transponovanej matici  $A^T$  zodpovedá stĺpcovej operácii na matici  $A$ , z práve dokázanej vety vyplýva, že pri výpočte hodnosti matice môžeme ľubovoľne kombinovať riadkové a stĺpcové operácie.

**Veta 5.7.16** (Frobeniova). *Nehomogénna sústava lineárnych rovníc (5.2) je riešiteľná práve vtedy, keď matica sústavy a rozšírená matica sústavy majú rovnakú hodnotu, t.j.*

$$h(A) = h(A').$$

*Dôkaz.* Označme  $\vec{\gamma} = (c_1, \dots, c_m)$  vektor pozostávajúci z pravých strán, čiže naša sústava má tvar  $A\vec{x}^T = \vec{\gamma}^T$ . Ďalej označme stĺpce matice  $A$  ako  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ .

$\Rightarrow$  Ak  $x_1, \dots, x_n$  je riešením tejto sústavy, znamená to, že

$$\vec{\gamma} = x_1\vec{\alpha}_1 + \dots + x_n\vec{\alpha}_n.$$

Z toho vyplýva

$$\begin{aligned} [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] &= [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\gamma}] \\ h(A^T) &= d([\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]) = d([\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\gamma}]) = h(A'^T) \end{aligned}$$

Pretože podľa predchádzajúcej vety má každá matica rovnakú hodnotu ako jej transponovaná matica, dostali sme

$$h(A) = h(A').$$

$\Leftarrow$  Predpokladajme teraz, že  $h(A) = h(A')$ . To znamená, že podpriestory  $[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  a  $[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\gamma}]$  majú rovnakú dimenziu. Pretože jeden z nich je navyše podpriestorom druhého, podľa tvrdenia 4.4.18 z toho vyplýva rovnosť

$$[\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n] = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n, \vec{\gamma}].$$

To znamená, že  $\vec{\gamma}$  je lineárnou kombináciou vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ , teda existujú  $x_1, \dots, x_n \in F$  také, že

$$\vec{\gamma} = x_1\vec{\alpha}_1 + \dots + x_n\vec{\alpha}_n.$$

Ako sme si už uvedomili v predchádzajúcej časti dôkazu, táto rovnosť je ekvivalentná s tým, že  $x_1, \dots, x_n$  je riešenie sústavy (5.2).  $\square$

Nasledujúca veta hovorí, že ak máme jedno konkrétne (partikulárne) riešenie nehomogénnej lineárnej sústavy, tak všetky ostatné riešenia nehomogénnej sústavy môžeme získať ako súčet tohoto riešenia a ľubovoľného riešenia príslušnej homogénnej sústavy.

Oveľa dôležitejší ako samotné znenie vety je veľmi dôležitý koncept rozdelenia riešenia na homogénnu a nehomogénnu časť. S týmto prístupom sa stretnete ešte veľakrát – dá sa využiť v podstate všade, kde sa vyskytuje linearita, napríklad pri lineárnych diferenciálnych rovniciach, pri lineárnych rekurentných rovniciach alebo tiež pri afinných priestoroch a afinných zobrazeniach – čo je niečo podobné ako vektorové priestory a lineárne zobrazenia, len sú doplnené o „nehomogénnu“ zložku (viac sa o afinných priestoroch môžete dočítať napríklad v [HZK]).

**Veta 5.7.17.** *Nech  $\vec{\alpha}$  je riešenie sústavy lineárnych rovníc*

$$A\vec{\alpha}^T = \vec{\gamma}^T \tag{N}$$

*a  $S$  je podpriestor pozostávajúci zo všetkých riešení homogénneho systému*

$$A\vec{\alpha}^T = \vec{0}^T. \tag{H}$$

*Potom  $T = \{\vec{\alpha} + \vec{\beta}; \vec{\beta} \in S\}$  je množina všetkých riešení (N).*

Inak povedané, ľubovoľné riešenie (N) sa dá získať ako súčet vektora  $\vec{\gamma}$  (partikulárneho riešenia (N)) a nejakého riešenia homogénnej sústavy (H).

*Dôkaz.* Rovnosť dvoch množín (množiny  $T$  a množiny všetkých riešení) budeme dokazovať tak, že dokážeme obe inklúzie.

Najprv ukážeme, že každý prvok množiny  $T$  je riešením sústavy (N). Skutočne, pre prvok tvaru  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}$  platí

$$A(\vec{\alpha} + \vec{\beta})^T = A\vec{\alpha}^T + A\vec{\beta}^T = \vec{\gamma}^T + \vec{0}^T = \vec{\gamma}^T.$$

Zostáva ukázať, že každé riešenie (N) má uvedený tvar. Nech teda  $\vec{\delta}$  je ľubovoľné riešenie (N), čiže platí  $A\vec{\delta}^T = \vec{\gamma}^T$ . Potom platí

$$A(\vec{\delta} - \vec{\alpha})^T = A\vec{\delta}^T - A\vec{\alpha}^T = \vec{\gamma}^T - \vec{\gamma}^T = \vec{0}^T.$$

Potom

$$\vec{\delta} = \vec{\alpha} + \underbrace{(\vec{\delta} - \vec{\alpha})}_{\in S},$$

teda je to súčet vektora  $\vec{\alpha}$  a prvku z  $S$ . Ukázali sme, že ľubovoľné riešenie (N) patrí do  $T$ .  $\square$

### Cvičenia

**Úloha 5.7.1.** Nájdite všetky riešenia daných sústav rovníc nad poľom  $\mathbb{R}$ :

$$\begin{array}{rcll} x_1 & -x_2 & +2x_3 & -3x_4 & = & 1 \\ & x_2 & -x_3 & +x_4 & = & -3 \\ x_1 & +3x_2 & & -3x_4 & = & 1 \\ & -7x_2 & +3x_3 & +x_4 & = & 3 \\ 2x & -5y & +3z & +t & = & 5 \\ 3x & -7y & +3z & -t & = & -1 \\ 5x & -9y & +6z & +2t & = & 7 \\ 4x & -6y & +3z & +t & = & 8 \\ x & +4y & -2z & +8t & = & 12 \\ & y & -7z & +2t & = & -4 \\ & & 5z & -t & = & 7 \\ & & z & +3t & = & -5 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcll} x_1 + x_2 & = & 1 \\ x_1 + x_2 + x_3 & = & 4 \\ x_2 + x_3 + x_4 & = & -3 \\ x_3 + x_4 + x_5 & = & 2 \\ x_4 + x_5 & = & -1 \\ x & +2y & +4z & -3t & = & 0 \\ 3x & +5y & +6z & -4t & = & 0 \\ 4x & +5y & -2z & +3t & = & 0 \\ 3x & +8y & +24z & -19t & = & 0 \end{array}$$

**Úloha 5.7.2.** Riešte v  $\mathbb{Z}_5$  sústavu určenú maticou:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 3 \\ 1 & 2 & 4 & 0 \\ 2 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 4 & 4 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 3 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 2 & 4 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & 3 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 & 3 \\ 3 & 4 & 3 & 2 \end{array}\right)$$

**Úloha 5.7.3.** Riešte v  $\mathbb{R}$  sústavu určenú maticou:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 3 & -2 & 1 & 11 \\ 1 & 1 & -3 & 7 \\ 11 & -4 & -3 & 10 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 2 \\ 3 & -1 & 2 & 7 \\ 2 & 1 & 1 & 7 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -3 & 1 \\ -1 & 3 & -2 & 3 \\ 0 & 5 & -5 & 4 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & -2 & 1 & 0 \\ 4 & 1 & -1 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 0 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 4 & -3 & 0 \\ 1 & -3 & -1 & 0 \\ 2 & 1 & -4 & 0 \end{array}\right)$$

Riešenie: a) nemá riešenie, b) (1,2,3) c)  $(t - \frac{3}{5}, t + \frac{4}{5}, t)$ , d)  $(\frac{20}{47}, \frac{6}{47}, -\frac{8}{47})$ , e)  $(\frac{13}{7}t, \frac{2}{7}t, t)$

**Úloha 5.7.4.** Riešte v  $\mathbb{Z}_7$  sústavu určenú maticou:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 1 & 1 & 6 \\ 3 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 3 & 6 & 1 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 2 & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 3 & 3 & 1 \\ 4 & 1 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 6 & 5 & 3 \end{array}\right) \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 4 & 4 & 1 \end{array}\right)$$



**Úloha 5.7.5.** Môžete si vymyslieť kopec vlastných sústav. Stačí najprv zvoliť riešenie, koeficienty a dorátať pravé strany. Skúste vymyslieť aj také sústavy, ktoré nemajú riešenie alebo majú viac než jedno riešenie.

**Úloha 5.7.6.** Nájdite reálne čísla  $a, b, c$  tak, aby graf funkcie  $f(x) = ax^2 + bx + c$  prechádzal bodmi  $(1,2)$ ,  $(-1,6)$  a  $(2,3)$ .

**Úloha 5.7.7.** Nájdite nejakú homogénnu sústavu rovníc so 4 neznámymi nad  $\mathbb{R}$ , ktorej riešením je daný podpriestor:

a)  $S = [(1, 4, 0, 1), (1, 0, 3, -3), (0, 2, 0, 1)]$

b)  $S = [(1, -1, 1, -2), (1, 1, 0, -1), (3, 1, 1, -4)]$

**Úloha 5.7.8.** Nájdite hodnotu parametra  $b \in \mathbb{R}$ , pre ktorú má daná sústava riešenie. Pre túto hodnotu aj vyjadrite množinu riešení.

$$\begin{aligned}x_1 + 4x_2 - 3x_3 + 2x_4 &= 2 \\2x_1 + 7x_2 - 4x_3 + 4x_4 &= 3 \\-x_1 - 5x_2 + 5x_3 - 2x_4 &= b \\3x_1 + 10x_2 - 5x_3 + 6x_4 &= 4\end{aligned}$$

**Úloha 5.7.9.** Zistite pre aké hodnoty parametra  $a \in \mathbb{R}$  systém

$$\begin{aligned}x + y + 7z &= -7 \\2x + 3y + 17z &= -16 \\x + 2y + (a^2 + 1)z &= 3a\end{aligned}$$

a) má práve jedno riešenie; b) má nekonečne veľa riešení; c) nemá žiadne riešenie.

**Úloha 5.7.10<sup>+</sup>.** V závislosti od parametra  $a \in \mathbb{R}$  riešte systém daný maticou:

a)  $\begin{pmatrix} a & 1 & | & a^2 \\ 1 & a & | & 1 \end{pmatrix}$  b)  $\begin{pmatrix} a & 1 & | & a^3 \\ 1 & a & | & 1 \end{pmatrix}$

**Úloha 5.7.11<sup>+</sup>.** Ako vyzerajú, v závislosti od parametra  $p$ , riešenia sústavy danej maticou:

$$\begin{pmatrix} p & 1 & 1 & 1 & | & 1 \\ 1 & p & 1 & 1 & | & 1 \\ 1 & 1 & p & 1 & | & 1 \\ 1 & 1 & 1 & p & | & 1 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.7.12\*.** O sústave  $n$  rovníc o  $n$  neznámých nad poľom  $\mathbb{R}$  vieme, že jej koeficienty tvoria aritmetickú postupnosť (ako napríklad pre maticu  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & | & 4 \\ 5 & 6 & 7 & | & 8 \\ 9 & 10 & 11 & | & 12 \end{pmatrix}$ ), že  $n \geq 2$  a že táto sústava má jediné riešenie. Nájdite riešenie sústavy.

## 5.8 Jadro a obraz lineárneho zobrazenia

**Definícia 5.8.1.** Nech  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad poľom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie. Potom *jadrom lineárneho zobrazenia*  $f$  nazývame množinu

$$\text{Ker } f = \{\vec{\alpha} \in V; f(\vec{\alpha}) = \vec{0}\}$$

a *obrazom lineárneho zobrazenia*  $f$  nazývame množinu

$$\text{Im } f = \{f(\vec{\alpha}); \vec{\alpha} \in V\}.$$

Inými slovami,  $\text{Ker } f$  obsahuje práve tie vektory z  $V$ , ktoré sa zobrazia na nulový vektor a  $\text{Im } f$  obsahuje obrazy všetkých vektorov z  $V$ . Lahko sa overí, že  $\text{Ker } f$  aj  $\text{Im } f$  sú vektorové podpriestory. (Môžete si všimnúť, že ide o špeciálny prípad úlohy 5.3.6.)

**Tvrdenie 5.8.2.** *Nech  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad polom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie. Potom  $\text{Ker } f$  je vektorový podpriestor priestoru  $V$  a  $\text{Im } f$  je vektorový podpriestor priestoru  $W$ .*

*Dôkaz.* Pretože  $f(\vec{0}) = \vec{0}$ , platí  $\vec{0} \in \text{Ker } f$ , teda  $\text{Ker } f \neq \emptyset$ .

Ak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in \text{Ker } f$ , znamená to, že  $f(\vec{\alpha}) = f(\vec{\beta}) = \vec{0}$ . Z linearity potom dostaneme

$$f(\vec{\alpha} + \vec{\beta}) = f(\vec{\alpha}) + f(\vec{\beta}) = \vec{0} + \vec{0} = \vec{0},$$

čiže aj  $\vec{\alpha} + \vec{\beta} \in \text{Ker } f$ .

Podobne, ak  $c \in F$  a  $\vec{\alpha} \in \text{Ker } f$ , dostaneme

$$f(c\vec{\alpha}) = c.f(\vec{\alpha}) = c.\vec{0} = \vec{0}$$

a  $c.\vec{\alpha} \in \text{Ker } f$ .

Pretože  $f(\vec{0}) = \vec{0}$ , platí  $\vec{0} \in \text{Im } f$ , teda  $\text{Im } f \neq \emptyset$ .

Ak  $\vec{\alpha}, \vec{\beta} \in \text{Im } f$ , znamená to, že tieto vektory sú obrazmi nejakých vektorov z  $V$ , označme ich  $\vec{\alpha}_1$  a  $\vec{\beta}_1$ . Máme teda

$$\begin{aligned} f(\vec{\alpha}_1) &= \vec{\alpha} \\ f(\vec{\beta}_1) &= \vec{\beta} \\ f(\vec{\alpha}_1 + \vec{\beta}_1) &= \vec{\alpha} + \vec{\beta} \end{aligned}$$

Teda vektor  $\vec{\alpha} + \vec{\beta}$  je obrazom vektora  $\vec{\alpha}_1 + \vec{\beta}_1$ , čiže patrí do  $\text{Im } f$ .

Podobne sa ukáže

$$c\vec{\alpha} = cf(\vec{\alpha}_1) = f(c\vec{\alpha}_1),$$

teda aj  $c\vec{\alpha} \in \text{Im } f$ . □

Všimnime si, že  $\text{Im } f$  vieme vygenerovať obrazmi generátorov priestoru  $V$ :

**Tvrdenie 5.8.3.** *Nech  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie a  $V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$ . Potom  $\text{Im } f = [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)]$ .*

*Dôkaz.*  $\subseteq$  Ak  $\vec{\beta} \in \text{Im } f$ , znamená to, že  $\vec{\beta} = f(\vec{\alpha})$  pre nejaké  $\vec{\alpha} \in V$ . Z toho, že  $\vec{\alpha} \in V = [\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n]$  máme, že  $\vec{\alpha}$  je lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ , teda sa dá vyjadriť ako  $\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n$ . Z linearity zobrazenia  $f$  potom máme

$$\vec{\beta} = f(\vec{\alpha}) = f(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n) = c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n).$$

Zistili sme, že  $\vec{\beta} \in [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)]$ .

$\supseteq$  Predpokladajme teraz, že  $\vec{\beta} \in [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_n)]$ . To znamená, že sa dá napísať ako lineárna kombinácia týchto vektorov, teda

$$\vec{\beta} = c_1f(\vec{\alpha}_1) + \dots + c_nf(\vec{\alpha}_n)$$

pre nejaké  $c_1, \dots, c_n \in F$ . Ak opäť použijeme to, že  $f$  je lineárne zobrazenie, tak dostaneme

$$\vec{\beta} = f(c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n).$$

Ukázali sme, že  $\vec{\beta}$  je obrazom vektora  $\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_n\vec{\alpha}_n \in V$ , teda  $\vec{\beta} \in \text{Im } f$ . □

Teraz si povieme, ako súvisí jadro a obraz lineárneho zobrazenia s tým, či je toto zobrazenie surjektívne alebo injektívne.

**Tvrdenie 5.8.4.** *Nech  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad polom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie.*

*Zobrazenie  $f$  je injektívne práve vtedy, keď  $\text{Ker } f = \{\vec{0}\}$ .*

*Dôkaz.*  $\Rightarrow$  Predpokladajme, že  $f$  je injektívne. Vieme, že  $f(\vec{0}) = \vec{0}$ . Z injektívnosti vyplýva, že iný vektor sa už na nulový vektor nemôže zobrazit, preto  $\text{Ker } f = \{\vec{0}\}$ .

$\Leftarrow$  Nech  $\text{Ker } f = \{\vec{0}\}$ . Ak  $f(\vec{\alpha}) = f(\vec{\beta})$ , tak  $f(\vec{\alpha} - \vec{\beta}) = \vec{0}$ , čiže  $\vec{\alpha} - \vec{\beta} \in \text{Ker } f$ . To ale znamená, že  $\vec{\alpha} - \vec{\beta} = \vec{0}$ , a teda  $\vec{\alpha} = \vec{\beta}$ .  $\square$

Dôkaz nasledujúceho tvrdenia vynecháme, ide vlastne len o inak prepísanú definíciu surjektívnosti.

**Tvrdenie 5.8.5.** *Nech  $V$  a  $W$  sú vektorové priestory nad polom  $F$  a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie.*

*Zobrazenie  $f$  je surjektívne práve vtedy, keď  $\text{Im } f = W$ .*

**Dôsledok 5.8.6.** *Lineárne zobrazenie  $f: V \rightarrow W$  je izomorfizmus práve vtedy, keď  $\text{Im } f = W$  a  $\text{Ker } f = \{\vec{0}\}$ .*

**Veta 5.8.7.** *Nech  $V$  a  $W$  sú konečnorozmerné vektorové priestory a  $f: V \rightarrow W$  je lineárne zobrazenie. Potom*

$$d(V) = d(\text{Ker } f) + d(\text{Im } f).$$

*Dôkaz.* Nech  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  je báza  $\text{Ker } f$  (teda  $d(\text{Ker } f) = k$ ). Bázu  $\text{Ker } f$  vieme doplniť na bázu celého priestoru  $V$  vektormi  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_l$ . (Teda  $d(V) = k + l$ .) Označme  $S = [\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_l]$ .

Definujme zobrazenie  $g: S \rightarrow \text{Im } f$  ako zúženie zobrazenia  $f$ , t.j.  $g(\vec{\alpha}) = f(\vec{\alpha})$  pre všetky  $\vec{\alpha} \in S$ . Ukážeme, že toto zobrazenie je izomorfizmus.

Je zrejmé, že ide o lineárne zobrazenie.

Ďalej máme  $\text{Im } f = [f(\vec{\alpha}_1), \dots, f(\vec{\alpha}_k), f(\vec{\beta}_1), \dots, f(\vec{\beta}_l)] = [\vec{0}, \dots, \vec{0}, f(\vec{\beta}_1), \dots, f(\vec{\beta}_l)] = [f(\vec{\beta}_1), \dots, f(\vec{\beta}_l)] = [g(\vec{\beta}_1), \dots, g(\vec{\beta}_l)] = \text{Im } g$ . Z toho vyplýva, že toto zobrazenie je surjektívne.

Ešte ukážeme, že  $g$  je injektívne. Na to nám stačí ukázať, že  $\text{Ker } g = \{\vec{0}\}$ . Priamo z definície zobrazenia  $g$  vidíme, že  $\text{Ker } g = \text{Ker } f \cap S$ . Tento prienik obsahuje iba nulový vektor. (Ak nejaký vektor  $\vec{\alpha}$  patrí do  $\text{Ker } g \cap S$ , tak sa dá vyjadriť súčasne ako lineárna kombinácia vektorov  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k$  a aj vektorov  $\vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_l$ . Keďže  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_k, \vec{\beta}_1, \dots, \vec{\beta}_l$  tvoria bázu, každý vektor má jednoznačné vyjadrenie ako lineárna kombinácia týchto vektorov. Porovnaním vyjadrení

$$\vec{\alpha} = c_1\vec{\alpha}_1 + \dots + c_k\vec{\alpha}_k + 0\vec{\beta}_1 + \dots + 0\vec{\beta}_l = 0\vec{\alpha}_1 + \dots + 0\vec{\alpha}_k + d_1\vec{\beta}_1 + \dots + d_l\vec{\beta}_l$$

dostaneme – na základe jednoznačnosti – že všetky koeficienty sú nulové a  $\vec{\alpha} = \vec{0}$ .)

Zistili sme teda, že  $f$  je izomorfizmus medzi priestormi  $S$  a  $\text{Im } f$ . Izomorfizmus zachováva dimenziu (pretože zobrazuje bázu na bázu), teda máme

$$l = d(S) = d(\text{Im } f)$$

a z toho dostaneme

$$d(V) = k + l = d(\text{Ker } f) + d(\text{Im } f).$$

$\square$

## Cvičenia

**Úloha 5.8.1.** Nájdite bázu obrazu a bázu jadra lineárneho zobrazenia  $f: (\mathbb{Z}_5)^4 \rightarrow (\mathbb{Z}_5)^4$  s danou maticou. V ktorých prípadoch je toto zobrazenie surjektívne a v ktorých injektívne?

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 4 \\ 2 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 4 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 2 \\ 1 & 4 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 0 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 1 & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

**Úloha 5.8.2.** Nájdite bázu a dimenziu  $\text{Ker } f$  aj  $\text{Im } f$  pre dané lineárne zobrazenie. Rozhodnite, či toto zobrazenie je injektívne, surjektívne, bijektívne.

- a)  $f: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^3$ ,  $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4, 2x_2 + x_3 + x_4, 4x_2 + 2x_3 + 2x_4)$ .  
 b)  $f: M_{2,2}(\mathbb{R}) \rightarrow M_{2,2}(\mathbb{R})$ ,  $f: \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} a+b & b+c \\ c+d & d+a \end{pmatrix}$   
 c)  $f: V \rightarrow V$ , kde  $V = \{ax^2 + bx + c; a, b, c \in \mathbb{R}\}$  je podpriestor  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  a  $f: p(x) \mapsto p'(x)$ . (T.j.  $f$  priradí polynómu  $p(x)$  jeho deriváciu  $p'(x)$ .)

**Úloha 5.8.3.** Nájdite lineárne zobrazenie (ak také existuje), ktoré je prosté a spĺňa podmienky:

- a)  $f(1, 0, 1) = (2, 2, 1)$ ,  $f(1, -1, 1) = (1, 2, -2)$ ,  $f(0, 1, -2) = (0, -1, 2)$ ,  
 b)  $f(1, 0, 1) = (2, 2, 1)$ ,  $f(1, -1, 1) = (1, 2, -2)$ ,  $f(1, 1, 1) = (3, 2, 4)$ ,  
 c)  $f(1, 0, 1) = (2, 2, 1)$ ,  $f(0, -1, 2) = (0, 1, 1)$ ,  $f(1, 1, -1) = (2, 3, 2)$ .

**Úloha 5.8.4.** Nájdite lineárne zobrazenie  $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  (ak také existuje), pre ktoré:  $f(3, 2, 3) = (5, -3, -2)$ ,  $f(0, 2, 1) = (2, 0, -2)$ ,  $f(3, 0, 3) = (3, -3, 0)$ . Určte bázu a dimenziu jeho jadra a obrazu.

**Úloha 5.8.5.** Definujme lineárne zobrazenie  $f: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^2$  ako  $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (3x_1 + x_2 + 2x_3 - x_4, 2x_1 + 4x_2 + x_3 - x_4)$  a označme  $U_1 = \text{Ker } f$ .

Ďalej definujme lineárne zobrazenie  $g: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^4$  ako  $g(y_1, y_2) = (y_1 - y_2, y_1 - 3y_2, 2y_1 - 8y_2, 3y_1 - 27y_2)$  a označme  $U_2 = \text{Im } g$ .

Vidíme, že  $U_1$  aj  $U_2$  sú podpriestory  $\mathbb{R}^4$ .

Nájdite bázy priestorov  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_1 \cap U_2$  a  $U_1 + U_2$ .

**Úloha 5.8.6.** Nech  $f: V \rightarrow V$  je lineárne zobrazenie. Ako  $f^2$  budeme označovať  $f \circ f$ . Dokážte

- (a)  $\text{Ker } f^2 \supseteq \text{Ker } f$ ,  
 (b)  $\text{Im } f^2 \subseteq \text{Im } f$ ,  
 (c)  $f^2 = 0 \Leftrightarrow \text{Ker } f \supseteq \text{Im } f$ .

**Úloha 5.8.7.** Nech  $f: V \rightarrow V$  je lineárne zobrazenie a  $g: V \rightarrow V$  je určené predpisom  $g(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha} - f(\vec{\alpha})$  (inak povedané,  $g = id_V - f$ ). Dokážte:

- a) Zobrazenie  $g$  je lineárne.  
 b) Ak  $\text{Ker } f = \text{Im } g$ , tak  $f \circ f = f$ . (Zobrazenie s takouto vlastnosťou sa zvykne nazývať *projekcia*.)

**Úloha 5.8.8.** Nech  $f: V \rightarrow V$  je lineárne zobrazenie a  $g: V \rightarrow V$  je určené predpisom  $g(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha} - f(\vec{\alpha})$  (inak povedané,  $g = id_V - f$ ). Dokážte:

- a) Zobrazenie  $g$  je lineárne.  
 b) Ak  $\text{Ker } f = \text{Im } g$ , tak  $f \circ f = f$ . (Zobrazenie s takouto vlastnosťou sa zvykne nazývať *projekcia*.)

**Úloha 5.8.9.** Dokážte, že  $h(A^T A) = h(A)$  pre ľubovoľnú maticu typu  $n \times n$  nad  $\mathbb{R}$ . (Hint 1: Možno pomôže, ak si uvedomíte, že v  $\mathbb{R}^n$  platí  $\vec{\alpha}\vec{\alpha}^T = 0 \Leftrightarrow \vec{\alpha} = \vec{0}$ . Hint 2: Iná možnosť je skúsiť to najprv dokázať pre RTM. Hint 3: Ak vymyslíte úplne iné riešenie, nedajte sa zviať zo stopy predchádzajúcimi dvoma hintami.)

**Úloha 5.8.10\***. Nech  $A, B$  sú štvorcové matice typu  $n \times n$  nad poľom  $F$ . Dokážte, že ak  $I - AB$  je regulárna, tak aj  $I - BA$  je regulárna.

## 5.9 Hodnosť transponovanej matice

Už sme jedným spôsobom ukázali, že

$$h(A) = h(A^T)$$

(veta 5.7.14). Tu uvedieme dva ďalšie spôsoby. Prvý z nich bude využívať práve dokázanú vetu 5.8.7.

*Dôkaz vety 5.7.14.* Ku matici  $A$  typu  $m \times n$  prislúcha lineárne zobrazenie  $f: F^m \rightarrow F^n$ . Vieme, že toto zobrazenie je určené predpisom

$$f(\vec{\alpha}) = \vec{\alpha}A$$

(poznámka 5.4.10).

Súčasne vieme, že podpriestor  $\text{Im } f$  je generovaný riadkami tejto matice. Preto  $h(A) = d(\text{Im } f)$ .

Do  $\text{Ker } f$  patria práve vektory, pre ktoré platí

$$\vec{\alpha}A = \vec{0},$$

z čoho transponovaním dostávame

$$A^T \vec{\alpha}^T = \vec{0}^T,$$

teda sú to práve riešenia homogénneho systému s maticou  $A^T$ . Podľa dôsledku 5.7.5 je dimenzia množiny riešení takéhoto systému rovná  $m - h(A^T)$  (pretože počet stĺpcov matice  $A$  je  $m$ ).

Z vety 5.8.7 potom dostaneme

$$m = m - h(A^T) + h(A),$$

z čoho vyplýva  $h(A^T) = h(A)$ . □

Uvedieme ešte jeden, pomerne jednoduchý dôkaz tejto vety.

*Dôkaz vety 5.7.14.* Dôkaz bude pozostávať z 2 častí: Najprv ukážeme, že táto veta platí pre redukované trojuholníkové matice. Ďalej si uvedomíme, že stĺpcové operácie nemenia hodnosť matice. Z toho už potom vyplynie tvrdenie vety.

Ak  $B$  je redukovaná trojuholníková matica typu  $m \times n$  a  $h(B) = k$ , znamená to, že  $B$  má  $k$  nenulových riadkov a navyše, má  $k$  stĺpcov, ktoré obsahujú jedinu (vedúcu) jednotku. Potom  $B^T$  je matica typu  $n \times m$ , v ktorej sú nenulové prvky iba v prvých  $k$  stĺpcoch a navyše obsahuje ako svoje riadky vektory  $\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_k$  štandardnej bázy priestoru  $F^m$  (tieto riadky zodpovedajú tým stĺpcom pôvodnej matice, v ktorých boli vedúce jednotky). Z toho je zrejmé, že priestor  $V_{B^T}$  prislúchajúci tejto matici je generovaný vektormi  $\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_k$  a teda  $h(B^T) = d(V_{B^T}) = k = h(B)$ .

Skúsme sa teraz zamyslieť nad tým ako menia dimenziu stĺpcové operácie. Každá stĺpcová operácia zodpovedá nejakému lineárnemu zobrazeniu  $F^m \rightarrow F^m$  (vykonanie stĺpcovej operácie znamená zobrazenia každého riadku týmto zobrazením). Konkrétne, výmene dvoch stĺpcov  $i$ -tého a  $j$ -tého stĺpca zodpovedá zobrazenie (pre  $i < j$ )

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (x_1, \dots, x_{i-1}, x_j, x_{i+1}, \dots, x_{j-1}, x_i, x_{j+1}, \dots, x_n)$$

pripočítaniu  $c$ -násobku  $i$ -teho stĺpca k  $j$ -temu zodpovedá

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (x_1, \dots, x_{j-1}, x_j + cx_i, x_{j+1}, \dots, x_n)$$

a vynásobeniu  $j$ -teho riadku konštantou  $c \neq 0$  zodpovedá zobrazenie

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (x_1, \dots, x_{j-1}, cx_j, x_{j+1}, \dots, x_n).$$

Každé z týchto zobrazení je lineárne a navyše k nemu existuje inverzné (to vyplýva napríklad z toho, že stĺpcové operácie sú invertovateľné, ale dá sa to ľahko overiť aj priamo). Všetky takéto zobrazenia sú teda izomorfizmy.

Pretože stĺpcová úprava zodpovedá zobrazeniu podpriestoru prislúchajúceho danej matici nejakým izomorfizmom a izomorfizmus nemení dimenziu, je zrejmé, že stĺpcové operácie nemenia hodnotu matice.

Majme teraz maticu  $A$ . Matica  $A$  je riadkovo ekvivaentná s nejakou redukovanou trojuholníkovou maticou  $B$ . Platí  $h(A) = h(B) = h(B^T)$ . Z matice  $B^T$  však vieme dostať maticu  $A^T$  pomocou elementárnych stĺpcových operácií. (Riadkové operácie na pôvodnej matici totiž zodpovedajú stĺpcovým operáciám na transponovanej matici.) Preto máme aj rovnosť  $h(B^T) = h(A^T)$  a spojením týchto dvoch rovností dostaneme

$$h(A) = h(A^T).$$

□

## Cvičenia

**Úloha 5.9.1.** Zistite hodnotu matice

$$A = \begin{pmatrix} b & b & b-a \\ a-b & -b & a \\ a+b & b & 0 \end{pmatrix}$$

v závislosti od hodnôt parametrov  $a, b \in \mathbb{R}$ .

## 5.10 Násobenie blokových matic\*

Ešte si stručne povedzme o inom pohľade na násobenie matic, ktorý sa môže v niektorých situáciách hodiť.

Niekedy je vhodné rozdeliť maticu na menšie podmatice, napríklad takýmto spôsobom:

$$M = \left( \begin{array}{cc|cc} 0 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 3 & 1 \\ 2 & -1 & 0 & 3 \end{array} \right).$$

T.j. zobrali sme nejakú maticu  $m \times n$  a nejakú sme rozdelili počty riadkov a počty stĺpcov; označme jednotlivé rozmery  $m = m_1 + \dots + m_k$  a  $n = n_1 + \dots + n_l$ . Takýmto spôsobom sme maticu rozdelili na  $k \times l$  menších matic, pričom matica na pozícii  $(i, j)$  má rozmery  $m_i \times n_j$ . Takto rozloženej matici zvykneme hovoriť *blokovaná matica*.

Teda maticu uvedenú v našom príklade by sme mohli zapísať ako

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

pre

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

V tomto prípade mali všetky bloky rovnaké rozmery. Nemusí to tak byť vždy, tú istú maticu by sme mohli rozdeliť aj takto:

$$M = \left( \begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 \\ \hline 2 & -1 & 0 & 3 \end{array} \right).$$

Iným, veľmi jednoduchým, príkladom zápisu matice ako blokovej matice by bolo rozdelenie matice na bloky veľkosti  $1 \times 1$ .

Otázka je, či nám takéto rozdelenie môže nejako pomôcť pri výpočte súčinu matic. Skúsme sa pozrieť najprv na nejaký jednoduchý prípad – opäť si zoberme nejaké dve matice veľkosti  $4 \times 4$  rozdelené na bloky  $2 \times 2$ . Pýtame sa, či platí:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E & F \\ G & H \end{pmatrix} \stackrel{?}{=} \begin{pmatrix} AE + BG & AF + BH \\ CE + DG & CF + DH \end{pmatrix}$$

Ako  $A, B, \dots, H$  sme označili matice rozmerov  $2 \times 2$ . Vďaka tomu všetky maticové súčiny na pravej strane majú zmysel a dostaneme tam maticu zloženú zo štyroch blokov veľkosti  $2 \times 2$ , teda maticu správnych rozmerov.

Ak chceme overiť uvedenú rovnosť, mohli by sme to urobiť tak, že porovnáme jednotlivé prvky v oboch maticiach. Pozrime sa na prvok na pozícii  $(1, 1)$  v súčine. Tento prvok dostaneme pomocou prvkov v prvom riadku prvej matice, čo sú konkrétne  $a_{11}, a_{12}, b_{11}, b_{12}$ ; a prvkov v prvom stĺpci druhej matice, teda  $e_{11}, e_{21}, f_{11}, f_{21}$ . Na pozícii  $(1, 1)$  potom dostaneme

$$a_{11}e_{11} + a_{12}e_{21} + b_{11}f_{11} + b_{12}f_{21}.$$

Všimnime si, že tento výraz môžeme prepísať ako  $(a_{11}e_{11} + a_{12}e_{21}) + (b_{11}f_{11} + b_{12}f_{21})$ . V tomto zápise je prvý sčítanec presne ľavý horný prvok matice  $AE$  a druhý sčítanec je ľavý horný prvok matice  $BG$ .

Teda naozaj v ľavom hornom rohu dostávame to isté, ak urobíme súčin matic aj ak sa pozrieme na maticu  $AE + BG$ .

Nemalo by nás veľmi prekvapiť, že to funguje (a že to takto bude fungovať aj všeobecne). V skutočnosti sme vlastne len rozdelili prvky v prvom riadku na prvky patriace matici  $A$  a prvky patriace matici  $B$ . To isté sme spravili v prvom stĺpci druhej matice.

Všeobecne by sme mohli sformulovať to, že matice sa dajú násobiť po blokoch, asi takto:

**Tvrdenie 5.10.1.** *Nech*

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & \dots & A_{mn} \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} B_{11} & \dots & B_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & \dots & A_{nk} \end{pmatrix}$$

sú blokové matice a navyše pre ľubovoľné prípustné  $i, j, k$  majú príslušné bloky  $A_{ij}$  a  $B_{jk}$  také rozmery, že sa tieto matice dajú násobiť. Potom ich súčin  $C = AB$  sa dá zapísať ako bloková matica pozostávajúca z  $m \times k$  blokov

$$C = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & \dots & A_{mk} \end{pmatrix}$$

pričom

$$C_{ij} = \sum_{s=1}^n A_{is} B_{sj}$$

pre  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, k$ .

Toto tvrdenie nebudeme dokazovať – dôkaz by bol len cvičením na zápis výrazov s viacerými indexami a asi by iba zahmlil základnú myšlienku, ktorú sme si už vysvetlili. Môžeme si všimnúť, že špeciálne prípady výsledku, ktorý sme sa tu snažili sformulovať všeobecne, sme už na niektorých miestach použili.

Napríklad výpočet v poznámke 5.4.10 je vlastne súčin blokových matíc (aj keď bloky v prvej matici sú veľkosti  $1 \times 1$ .)

Podobne sa dá pozeráť na to, čo sme robili v časti 5.6 týkajúcej sa súvisu elementárnych riadkových operácií so súčinom matíc. Konkrétne sa tam vyskytol krok, ktorý môžeme zapísať aj ako  $E(A|I) = (EA|EI)$ . (To, že urobiť riadkovú operáciu na celej matici, alebo zvlášť na oboch častiach matice rozdelenej uvedeným spôsobom, nie je nič prekvapivé. Tu to uvádzame len ako ďalšiu ilustráciu súčinu blokových matíc.)

Takisto niektoré argumenty použité v dôkaze vety 5.7.11 predstavujú vlastne násobenie blokových matíc. (Opäť ide o pomerne jednoduchý prípad, keďže jednu z matíc sme rozdelili iba na jediný blok a druhú na stĺpce.)

Podobné argumenty sa vyskytnú napríklad aj v dôkaze vety 6.4.1 o determinante súčinu matíc.



# Kapitola 6

## Determinanty

### 6.1 Motivácia

Na začiatku tejto kapitoly uvidíme dva motivačné príklady. Ako neskôr uvidíme, v oboch z nich určitým spôsobom vystupujú determinanty, jeden z nich nám ponúka aj istú geometrickú predstavu o pojme determinantu.

**Príklad 6.1.1.** Pokúsme sa nájsť všeobecné riešenie sústavy

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = c_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = c_2$$

Prvú rovnicu vynásobíme  $a_{22}$  a odčítame od nej  $a_{12}$ -násobok druhej rovnice. Dostaneme:

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})x_1 = c_1a_{22} - c_2a_{12}$$

$$x_1 = \frac{c_1a_{22} - c_2a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}$$

v prípade, že  $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \neq 0$ .

Ak zavedieme označenie

$$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{vmatrix} = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21},$$

tak predchádzajúcu rovnosť môžeme vyjadriť ako

$$x_1 = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & a_{12} \\ c_2 & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}.$$

Podobným spôsobom by sme mohli odvodiť, že platí

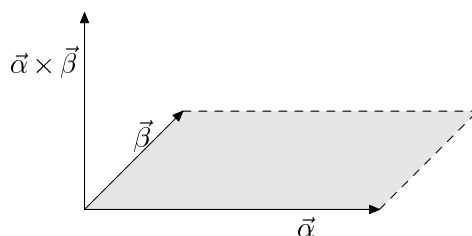
$$x_2 = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & c_1 \\ a_{21} & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}.$$

Definíciu, ktorú sme zaviedli v predchádzajúcom príklade, neskôr rozšírime aj na štvorcové matice väčších rozmerov ako  $2 \times 2$  a práve tento výraz budeme nazývať determinant.

**Príklad 6.1.2.** Dva vektory v rovine určujú rovnobežník. Zo strednej školy viete, že jeho obsah možno vypočítať pomocou vektorového súčinu (obrázok 6.1). Konkrétne, ak je rovnobežník určený vektormi  $\vec{\alpha} = (a_{11}, a_{12})$  a  $\vec{\beta} = (a_{21}, a_{22})$ , tak tieto vektory najprv doplníme tretou súradnicou 0 na vektory  $(a_{11}, a_{12}, 0)$  a  $(a_{21}, a_{22}, 0)$  a potom vypočítame ich vektorový súčin  $(0, 0, a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})$ . Obsah rovnobežníka je veľkosť vektora, ktorý sme vyrátali, čiže

$$S = |a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}|.$$

Až na znamienko sme opäť dostali výraz z predchádzajúceho príkladu (čiže determinant). (Pričom znamienko má tiež svoj význam – určuje orientáciu vektorov.)



Obr. 6.1: Vektorový súčin

Pokúsme sa ešte pokúsiť o riešenie analogickej úlohy v trojrozmernom priestore. V tomto prípade 3 vektory  $\vec{\alpha}$ ,  $\vec{\beta}$ ,  $\vec{\gamma}$  určia rovnobežnostenu. Jeho objem by sme vedeli vyrátať ako súčin obsahu podstavy a jeho výšky. Pritom výšku môžeme určiť ako priemet vektora  $\vec{\gamma}$  do smeru vektora  $\vec{\alpha} \times \vec{\beta}$ . Tento priemet sa dá vyrátať ako  $|\vec{\gamma}| \cos \alpha$ , kde  $\alpha$  je uhol, ktorý zvierajú vektory  $\vec{\alpha} \times \vec{\beta}$  a  $\vec{\gamma}$ .

Teda až na znamienko je jeho objem určený výrazom

$$|\vec{\alpha} \times \vec{\beta}| |\vec{\gamma}| \cos \alpha = (\vec{\alpha} \times \vec{\beta}) \cdot \vec{\gamma},$$

kde  $\cdot$  označuje skalárny súčin vektorov. (Budeme sa ním zaoberať neskôr, ale už ste sa s ním stretli aj na strednej škole a poznáte niektoré jeho základné vlastnosti.)

Pokúsme sa vyčísliť tento výraz pre

$$\vec{\alpha} = (a_{11}, a_{12}, a_{13})$$

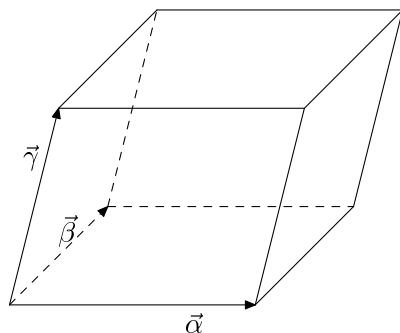
$$\vec{\beta} = (a_{21}, a_{22}, a_{23})$$

$$\vec{\gamma} = (a_{31}, a_{32}, a_{33})$$

Vieme, že  $\vec{\alpha} \times \vec{\beta} = (| \begin{smallmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{smallmatrix} |, -| \begin{smallmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{smallmatrix} |, | \begin{smallmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{smallmatrix} |)$ .

Dostaneme teda

$$\begin{aligned} & a_{31} \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{22} & a_{23} \end{vmatrix} - a_{32} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{21} & a_{23} \end{vmatrix} + a_{33} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \\ & a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31} \end{aligned}$$

Obr. 6.2: Rovnobežnosť určený 3 vektormi v  $\mathbb{R}^3$ 

Odvodili sme výrazy, ktoré predstavujú determinant štvorcovej matice  $2 \times 2$  a  $3 \times 3$ . Ako by sme mohli túto definíciu rozšíriť na vyššie rozmery?

Mohli by sme postupovať analogicky ako v predchádzajúcich príkladoch. Jedna možnosť, ako by sme definovali determinanty, by bolo všeobecné riešenie rovníc vyšších stupňov. Vychádzali by nám síce čoraz komplikovanejšie výrazy, ale snáď by sme v nich časom objavili nejakú zákonitosť.

Príklad 6.1.2 nám dáva dobrú geometrickú predstavu determinantu – ako objem telesa určeného danými vektormi v  $\mathbb{R}^n$ . Nie je však úplne jasné, čo chápať pod objemom v  $n$ -rozmernom priestore. Ale snáď by sme na to vedeli prísť. Objem jednotkovej kocky – čiže  $n$ -rozmerného rovnobežnostena určeného vektormi  $\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n$  – je zrejmé 1. A vieme celkom dobre popísať (na základe analógie s dvojrozmerným a trojrozmerným prípadom), ako sa tento objem zmení pri transformáciách ako je skosenie, natiahnutie v smere niektorej z jeho strán alebo súmernosť podľa roviny (či skôr „nadroviny“, ako sa zvykne nazývať  $(n-1)$ -rozmerný podpriestor v  $\mathbb{R}^n$ ). A pomocou týchto transformácií by sme vedeli dostať z jednotkovej kocky ľubovoľný  $n$ -rozmerný rovnobežnosť (prínajmenšom v trojrozmere máme o tom celkom dobrú geometrickú predstavu; neskôr si niečo povieme aj o tom ako súvisia tieto transformácie s riadkovými operáciami na matici), takže takýmto spôsobom by sme tiež boli schopný vyrátať objem každého rovnobežnostena – a teda ľubovoľný determinant.

Nebudeme postupovať ani jedným z naznačených spôsobov – naša definícia determinantu bude celkom iná a na prvý pohľad veľmi zvláštna. Neskôr však uvidíme, že pri našej definícii budú platiť pre riešenie sústavy  $n$  rovníc o  $n$  neznámych analogické vzťahy ako sme dostali v príklade 6.1.1 a takisto sa determinant správa vzhľadom na niektoré transformácie spôsobom, ktorý sme pred chvíľou spomenuli.

## 6.2 Definícia determinantu

**Definícia 6.2.1.** V tejto kapitole budeme označovať ako  $S_n$  množinu všetkých permutácií množiny  $\{1, 2, \dots, n\}$ .

Dvojica  $(\varphi(k), \varphi(s))$  sa volá *inverzia* permutácie  $\varphi$ , ak  $k < s$  ale  $\varphi(k) > \varphi(s)$ . Počet inverzií permutácie  $\varphi$  budeme označovať  $i(\varphi)$ .

**Príklad 6.2.2.** Permutácia  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$  má 4 inverzie (4,1), (4,3), (4,2), (3,2):

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

$$\begin{array}{cccc} 4 & 1 & & \\ 4 & & 3 & \\ 4 & & & 2 \\ & & 3 & 2 \end{array}$$

**Definícia 6.2.3.** Nech  $A$  je matrica typu  $n \times n$  nad polom  $F$ ,  $A = \|a_{ij}\|$ . *Determinant matice*  $A$  je

$$|A| = \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)} a_{2\varphi(2)} \cdots a_{n\varphi(n)}. \quad (6.1)$$

Symbolom  $\sum_{\varphi \in S_n}$  rozumieme, že sčítujeme cez celú množinu  $S_n$ , teda pre každú permutáciu  $\varphi \in S_n$  pripočítame jeden sčítanec uvedeného tvaru. (Množina  $S_n$  je konečná, teda takýto súčet je jednoznačne definovaný.)

**Príklad 6.2.4.** Ak máme maticu typu  $1 \times 1$  tak dostaneme  $|A| = |a_{11}| = a_{11}$ .

Pre maticu typu  $2 \times 2$  tiež dostaneme jednoduchý vzorec.  $S_2$  obsahuje len 2 permutácie  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$  a  $\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ . Prvá z nich nemá inverzie, druhá má jednu inverziu. Z (6.1) dostaneme v tomto prípade

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

V prípade matice typu  $3 \times 3$  obsahuje množina  $S_3$  už 6 prvkov. V nasledujúcej tabuľke sú vypísané všetky permutácie z  $S_3$ , ich inverzie a počet inverzií.

$\varphi$	$i(\varphi)$	inverzie
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$	0	
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}$	1	(3, 2)
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$	1	(2, 1)
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$	2	(2, 1) (3, 1)
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$	2	(3, 1) (3, 2)
$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$	3	(3, 2) (3, 1) (2, 1)

Z (6.1) teda dostaneme (permutácie uvedieme v takom poradí, aby išli najprv tie, ktoré majú kladné znamienko, čiže párny počet inverzií)

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}.$$

Tento vzorec pre výpočet determinantu matice  $3 \times 3$  nazývame *Sarrusovo pravidlo*.

Spôsob, ako si ho možno ľahko zapamätať, je pridať ešte raz k matici  $A$  je prvé 2 stĺpce. Súčiny na hlavných diagonálach dávame do vzorca s kladným znamienkom, súčiny na vedľajších diagonálach so záporným znamienkom.

$$\begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{11} & a_{12} & & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{21} & a_{22} & & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{21} & a_{22} \\ & & a_{31} & a_{32} & a_{31} & a_{32} & & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{31} & a_{32} \\ & & & & & & & & & & & & + & + & + & - & - & - \end{array}$$

Ten istý výsledok dostaneme ako pod maticu podpíšeme ešte raz jej prvé 2 riadky.

Inou mnemotechnickou pomôckou je vyznačiť si „kladné“ a „záporné“ diagonály v pôvodnej matici – bez pripisovania prvkov matice.

$$\begin{array}{ccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33}
 \end{array}$$

**Príklad 6.2.5.**  $\begin{vmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 1 \cdot 3 \cdot 2 + 3 \cdot 1 \cdot 0 + 2 \cdot 1 \cdot 1 - 2 \cdot 3 \cdot 0 - 1 \cdot 1 \cdot 1 - 2 \cdot 3 \cdot 1 = 1$

Priamo z definície sa dá dokázať užitočná vlastnosť determinantu: determinant transponovanej matice je rovnaký ako determinant pôvodnej matice.

**Veta 6.2.6.** *Nech  $A$  je matica typu  $n \times n$ . Potom*

$$|A| = |A^T|.$$

*Dôkaz.* V definícii determinantu (6.1) vystupujú súčiny tvaru  $a_{1\varphi(1)}a_{2\varphi(2)} \cdots a_{n\varphi(n)}$ . Okamžite vidíme, že v takomto súčine sa objaví práve raz prvok prvého riadku matice  $A$  (konkrétne na prvom mieste), práve raz prvok druhého riadku, atď.

Ako je to so stĺpcami? Druhé súradnice, ktoré predstavujú stĺpce, sú  $\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(n)$ . Vďaka tomu, že  $\varphi$  je bijekcia, objaví sa každý stĺpec práve raz. Konkrétne prvok  $j$ -tého stĺpca sa vyskytne v činiteli  $a_{\varphi^{-1}(j)j}$  (lebo  $i = \varphi^{-1}(j)$  je presne to číslo, ktoré sa zobrazí na  $j$ , čiže spĺňa  $\varphi(i) = j$ ).

Ak teda usporiadame činitele vystupujúce v takomto súčine nie podľa prvých, ale podľa druhých súradnic, dostaneme iný zápis pre ten istý súčin.

$$a_{1\varphi(1)}a_{2\varphi(2)} \cdots a_{n\varphi(n)} = a_{\varphi^{-1}(1)1}a_{\varphi^{-1}(2)2} \cdots a_{\varphi^{-1}(n)n}.$$

Sčítaním takýchto rovností cez všetky permutácie  $\varphi \in S_n$  dostaneme

$$|A| = \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)}a_{2\varphi(2)} \cdots a_{n\varphi(n)} = \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{\varphi^{-1}(1)1}a_{\varphi^{-1}(2)2} \cdots a_{\varphi^{-1}(n)n}.$$

Označme prvok v  $i$ -tom riadku a  $j$ -tom stĺpci transponovanej matice ako  $a'_{ij}$ , t.j.  $a'_{ij} = a_{ji}$ .

Potom poslednú rovnosť môžeme prepísať ako

$$|A| = \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a'_{1\varphi^{-1}(1)}a'_{2\varphi^{-1}(2)} \cdots a'_{n\varphi^{-1}(n)}.$$

Ďalej si uvedomme, že priradenie  $\varphi \mapsto \varphi^{-1}$  je bijekcia z  $S_n$  do  $S_n$ . (Lahko to môžete overiť na základe vlastností inverzného zobrazenia. Vyplýva to napríklad aj z toho, že  $(S_n, \circ)$  je grupa (úloha 3.2.2) a z úlohy 3.2.12.) Teda, ak v predchádzajúcej sume namiesto  $\varphi^{-1}$  použijeme všade  $\varphi$ , znamená to len preusporiadanie sčítancov, ale hodnotu súčtu to neovplyvní.

$$|A| = \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi^{-1})} a'_{1\varphi(1)}a'_{2\varphi(2)} \cdots a'_{n\varphi(n)}.$$

Na to, aby sme vpravo dostali determinant matice  $A^T$ , stačilo by dokázať, že  $i(\varphi) = i(\varphi^{-1})$ . To skutočne platí. Inverzie permutácie  $\varphi$  sú totiž určené takými dvojicami indexov, pre ktoré platí

$$i < j \quad \wedge \quad \varphi(i) > \varphi(j).$$

Ak označíme  $i' = \varphi(i)$  a  $j' = \varphi(j)$ , tak predchádzajúca podmienka je ekvivalentná podmienke

$$\varphi^{-1}(i') < \varphi^{-1}(j') \quad \wedge \quad i' > j'.$$

Našli sme teda jedno-jednoznačné priradenie medzi dvojicami, ktoré určujú inverzie permutácií  $\varphi$  a  $\varphi^{-1}$ . Teda skutočne platí  $i(\varphi) = i(\varphi^{-1})$  a

$$|A| = |A^T|.$$

□

## 6.3 Výpočet determinantov

Doteraz sme uviedli ako počítať determinanty rozmeru maximálne  $3 \times 3$ , pričom sme vlastne postupovali priamo z definície. Na výpočet determinantov vyššieho stupňa sa naučíme dva postupy. Prvý z nich je Laplaceov rozvoj a druhý je použitie elementárnych riadkových a stĺpcových operácií.

### 6.3.1 Laplaceov rozvoj

Nech  $A$  je štvorcová matica typu  $n \times n$ . Zvoľme si (pevne) nejaké  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Potom determinant matice  $A$  sa dá upraviť na tvar

$$|A| = a_{i1}A_{i1} + a_{i2}A_{i2} + \dots + a_{in}A_{in}.$$

Vyplyva to z toho, že v každom sčítanci v sume (6.1) vystupuje práve jeden prvok tvaru  $a_{ik}$  (konkrétne je to  $a_{i\varphi(i)}$ ). Aby sme získali uvedenú rovnosť, stačí vyňať  $a_{ij}$  z tých sčítancov v ktorých sa vyskytuje.

Podobne by sme mohli postupovať aj pre prvky niektorého stĺpca  $a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj}$ . Dostali by sme

$$|A| = a_{1j}A_{1j} + a_{2j}A_{2j} + \dots + a_{nj}A_{nj}.$$

Výraz  $A_{ij}$  nazývame *algebraický doplnok prvku*  $a_{ij}$ .

Naším najbližším cieľom bude zistiť, čomu sa rovná  $A_{ij}$ .

Pokúste sa sami si vyskúšať zistiť všetky možné hodnoty  $A_{ij}$  pre maticu  $3 \times 3$ , výsledky si môžete skontrolovať v nasledujúcom príklade.

**Príklad 6.3.1.** Pre maticu typu  $3 \times 3$  sme odvodili

$$|A| = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31}.$$

Skúsme v tomto konkrétnom prípade urobiť spomínaný rozvoj pre druhý riadok a druhý stĺpec.

Pre druhý riadok dostaneme:

$$|A| = a_{21}(a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33}) + a_{22}(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + a_{23}(a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32})$$

Pre druhý stĺpec dostaneme:

$$|A| = a_{12}(a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33}) + a_{22}(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + a_{32}(a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})$$

Z uvedených výrazov vieme vyčítať hodnoty  $A_{12}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{32}$ . Keby sme urobili ešte 2 ďalšie rozvoje (povedzme podľa prvého a tretieho riadku), zistili by sme aj ostatné hodnoty algebraických doplnkov.

$$\begin{aligned}
A_{11} &= a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32} \\
A_{12} &= a_{23}a_{31} - a_{21}a_{33} \\
A_{13} &= a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31} \\
A_{21} &= a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33} \\
A_{22} &= a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31} \\
A_{23} &= a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32} \\
A_{31} &= a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22} \\
A_{32} &= a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23} \\
A_{33} &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}
\end{aligned}$$

Možno by ste z hodnôt vyrátaných v predchádzajúcom príklade vedeli uhádnuť nejakú všeobecnú zákonitosť. Váš tip sa potvrdí dokázaním nasledujúcej vety.

Pre maticu  $A$  typu  $n \times n$  a  $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$  označíme ako  $M_{ij}$  maticu, ktorá vznikne z matice  $A$  vynechaním  $i$ -teho riadku a  $j$ -teho stĺpca.

**Veta 6.3.2.** *Pre algebraický doplnok prvku  $a_{rs}$  štvorcovej matice  $A$  platí*

$$A_{rs} = (-1)^{r+s} |M_{rs}|$$

*Dôkaz.* Priamo z definície vyplýva, že

$$A_{rs} = \sum_{\varphi' \in S_n^{rs}} (-1)^{i(\varphi')} a_{1, \varphi'(1)} a_{2, \varphi'(2)} \cdots a_{r-1, \varphi'(r-1)} a_{r+1, \varphi'(r+1)} \cdots a_{n, \varphi'(n)},$$

kde ako  $S_n^{rs}$  sme označili množinu tých permutácií z  $S_n$ , pre ktoré  $\varphi'(r) = s$ .

Pre maticu  $M_{rs}$  tejto permutácii zodpovedá permutácia  $\varphi$ , ktorá je určená predpisom

$$\varphi(k) = \begin{cases} \varphi'(k), & \text{ak } \varphi'(k) < s \\ \varphi'(k) - 1, & \text{ak } \varphi'(k) > s \end{cases} \quad \text{pre } k < r$$

$$\varphi(k) = \begin{cases} \varphi'(k+1), & \text{ak } \varphi'(k+1) < s \\ \varphi'(k+1) - 1, & \text{ak } \varphi'(k+1) > s \end{cases} \quad \text{pre } k \geq r.$$

Chceli by sme zistiť, aký je vzťah medzi  $i(\varphi')$  a  $i(\varphi)$ . Každá inverzia permutácie  $\varphi$  zodpovedá nejakej inverzii pôvodnej permutácie  $\varphi'$ . Niektoré inverzie sme však stratili:

a) Ak platí  $\varphi'(j) > s$  pre  $j < r$ , tak dvojica  $(\varphi'(j), s)$  tvorí inverziu pôvodnej permutácie, ale v permutácii  $\varphi$  nemáme inverziu, ktorá by jej zodpovedala. Označme počet takýchto inverzií  $k$ . Znamená to, že medzi prvkami  $j \in \{1, 2, \dots, r-1\}$  je  $k$  prvkov takých, že  $\varphi'(j) > s$ . Pre zostávajúcich  $(r-1) - k$  prvkov teda platí  $\varphi'(j) < s$ . (Nemôže platiť  $\varphi'(j) = s$ , lebo na  $s$  sa zobrazí jedine  $r$ .)

b) Ak  $\varphi'(j) < s$  pre  $j > r$ , tak opäť dostaneme inverziu, ku ktorej nemáme zodpovedajúcu inverziu v permutácii  $\varphi$ . Prvkov s vlastnosťou  $\varphi'(j) < s$  je práve  $s-1$ . Pritom, ako sme videli v prípade a), z nich práve  $(r-1) - k$  spĺňa nerovnosť  $j < r$ . Inverzií typu b) je teda  $(s-1) - [(r-1) - k] = s - r + k$ .

Spolu sme „stratili“  $s - r + 2k$  inverzií. Teda  $i(\varphi') = i(\varphi) + s - r + 2k$  a

$$(-1)^{i(\varphi')} = (-1)^{i(\varphi)} + (-1)^{s-r} + (-1)^{2k} = (-1)^{i(\varphi)} + (-1)^{s+r}.$$

Dosadením do vyjadrenia pre  $A_{rs}$ , ak navyše zavedieme označenie  $M_{rs} = ||b_{ij}||$ , získame dokazovanú rovnosť

$$A_{rs} = (-1)^{r+s} \sum_{\varphi \in S_{n-1}} (-1)^{i(\varphi)} b_{1\varphi(1)} \cdots b_{n\varphi(n)} = (-1)^{r+s} |M_{ij}|.$$

□

Pretože predchádzajúci dôkaz nie je úplne jednoduchý, uvedieme ešte iný, do istej miery podobný (v nádeji, že keď uvidíte viacero pohľadov na dôkaz tej istej vety, bude to o čosi jasnejšie).

*Dôkaz.* Kvôli jednoduchosti začneme s prípadom  $r = s = n$ . Priamo z definície determinantu vidíme, že  $a_{nn}$  sa vyskytne v tých sčítancoch, kde  $\varphi(n) = n$ . To ale znamená, že permutácia  $\varphi$  zobrazí  $\{1, 2, \dots, n-1\}$  na  $\{1, 2, \dots, n-1\}$ , čiže takéto permutácie sú v jednojednoznačnej korešpondencii s permutáciami množiny  $\{1, 2, \dots, n-1\}$ . Navyše počet inverzií zodpovedajúcich si permutácií je očividne rovnaký. (Vynechali sme len  $\varphi(n) = n$ , tento prvok nevystupoval v žiadnej inverzii.) Máme teda

$$A_{nn} = \sum_{\varphi \in S_{n-1}} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)} a_{2\varphi(2)} \cdots a_{n-1,\varphi(n-1)} = |M_{nn}|.$$

(Opäť, priamo z definície dostaneme, že výraz na pravej strane rovnosti je determinant matice, ktorá vznikne vynechaním posledného riadku a posledného stĺpca.)

Ďalej sa pozrime na to, ako sa zmení algebraický doplnok  $A_{rs}$  ak vymeníme  $r$ -tý riadok matice  $A$  s nasledujúcim. Nech teda matice  $B$  vznikne z matice  $A$  tak, že vymeníme  $r$ -tý a  $(r+1)$ -vý riadok. Chceme porovnať sčítance vystupujúce v determinante matice  $A$  obsahujúce prvok  $a_{rs}$  s tými sčítancami v determinante matice  $B$ , ktoré obsahujú  $b_{r+1,s} = a_{rs}$ . V prvom prípade sčítujeme cez všetky permutácie také, že  $\varphi(r) = s$  (množinu týchto permutácií označíme opäť  $S_n^{r,s}$ ).

$$A_{rs} = \sum_{\varphi \in S_n^{r,s}} (-1)^{i(\varphi)} a_{1,\varphi(1)} \cdots a_{r-1,\varphi(r-1)} a_{r+1,\varphi(r+1)} \cdots a_{n,\varphi(n)}.$$

Pri výpočte  $B_{r+1,s}$  sčítujeme cez všetky permutácie také, že  $\varphi(r+1) = s$ :

$$B_{r+1,s} = \sum_{\varphi \in S_n^{r+1,s}} (-1)^{i(\varphi)} b_{1,\varphi(1)} \cdots b_{r-1,\varphi(r-1)} b_{r,\varphi(r)} b_{r+2,\varphi(r+2)} \cdots b_{n,\varphi(n)}.$$

Súčasne, z definície matice  $B$  máme  $b_{ij} = a_{ij}$  pre  $i \neq r, r+1$  a  $b_{rs} = a_{r+1,s}$ , teda

$$B_{r+1,s} = \sum_{\varphi \in S_n^{r+1,s}} (-1)^{i(\varphi)} a_{1,\varphi(1)} \cdots a_{r-1,\varphi(r-1)} a_{r+1,\varphi(r)} a_{r+2,\varphi(r+2)} \cdots a_{n,\varphi(n)}.$$

Uvedomme si ďalej, že výmena prvkov na  $r$ -tej a  $(r+1)$ -vej pozícii dáva korešpondenciu medzi množinami  $S_n^{r,s}$  a  $S_n^{r+1,s}$ . Konkrétne, z permutácie

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & r & r+1 & \cdots & n \\ \varphi(1) & \cdots & s & \varphi(r+1) & \cdots & \varphi(n) \end{pmatrix}$$

patriacej do  $S_n^{r,s}$  dostaneme permutáciu

$$\varphi' = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & r & r+1 & \cdots & n \\ \varphi(1) & \cdots & \varphi(r+1) & s & \cdots & \varphi(n) \end{pmatrix}$$

patriacu do  $S_n^{r+1,s}$  a obrátene. Vďaka tejto bijektívnej korešpondencii môžeme predchádzajúcu sumu prepísať ako

$$B_{r+1,s} = \sum_{\varphi \in S_n^{r,s}} (-1)^{i(\varphi')} a_{1,\varphi(1)} \cdots a_{r-1,\varphi(r-1)} a_{r+1,\varphi(r+1)} a_{r+2,\varphi(r+2)} \cdots a_{n,\varphi(n)}.$$



Vidíme, že v oboch sumách sa vyskytujú presne tie isté členy, zostáva len zistiť aký je vzťah medzi  $i(\varphi)$  a  $i(\varphi')$ . Tieto permutácie sa líšia len na  $r$ -tom a  $(r+1)$ -mieste, čiže jediná inverzia, ktorou sa môžu líšiť, je  $(\varphi(r), \varphi(r+1))$ . Skutočne, ak  $(s, \varphi(r+1))$  tvoria inverziu permutácie  $\varphi$ , tak v novej permutácii nebudeme mať na tomto mieste inverziu a obrátene, ak tu  $\varphi$  nemá inverziu, vo  $\varphi'$  dostaneme inverziu. Počet permutácií sa teda líši o túto jednu inverziu, čiže  $i(\varphi') = i(\varphi) \pm 1$ , a teda

$$B_{r+1,s} = - \sum_{\varphi \in S_n^{r,s}} (-1)^{i(\varphi)} a_{1,\varphi(1)} \dots a_{r-1,\varphi(r-1)} a_{r+1,\varphi(r+1)} a_{r+2,\varphi(r+2)} \dots a_{n,\varphi(n)} = -A_{rs}.$$

Vďaka vete 6.2.6 vieme, že to isté sa stane pri výmene susedných stĺpcov.

Posledné pozorovanie potrebné na dokončenie dôkazu je, že podmatica  $M_{rs}$  matice  $A$  je rovnaká ako podmatica  $M_{r+1,s}$  matice  $B$ . (Z matice  $B$  vynechávame  $(r+1)$ -vý riadok, čo je presne  $r$ -tý riadok pôvodnej matice.)

Ak teraz chceme zistiť algebraický doplnok  $A_{rs}$  prvku  $a_{rs}$  matice  $A$ , môžeme postupovať tak, že  $n-r-1$  výmenami susedných riadkov presunieme prvok  $a_{rs}$  do  $n$ -tého riadku, a potom urobíme ešte  $n-s-1$  výmen stĺpcov, po ktorých prvok  $a_{rs}$  pôvodnej matice bude prvkom  $c_{nn}$  matice  $C$ , ktorú takto dostaneme. Už vieme, že algebraický doplnok tohoto prvku je

$$A_{nn} = |M_{rs}|$$

(podmatica, ktorá vznikne z  $C$  vynechaním posledného riadku a posledného stĺpca je presne tá podmatica pôvodnej matice, ktorú sme dostali vynechaním  $r$ -tého riadku a  $s$ -tého stĺpca.) Súčasne sme pri každej výmene riadku/stĺpca zmenili znamienko, preto

$$A_{rs} = (-1)^{n-r+n-s} A_{nn} = (-1)^{2(n-r-s)+r+s} A_{nn} = (-1)^{r+s} A_{nn} = (-1)^{r+s} |M_{rs}|.$$

□

**Dôsledok 6.3.3** (Laplaceov rozvoj determinantu). *Nech  $A$  je matica typu  $n \times n$ . Potom*

$$|A| = (-1)^{i+1} a_{i1} |M_{i1}| + (-1)^{i+2} a_{i2} |M_{i2}| + \dots + (-1)^{i+n} a_{in} |M_{in}| \quad (6.2)$$

$$|A| = (-1)^{j+1} a_{1j} |M_{1j}| + (-1)^{j+2} a_{2j} |M_{2j}| + \dots + (-1)^{j+n} a_{nj} |M_{nj}| \quad (6.3)$$

Prvú rovnosť uvedenú v predchádzajúcom dôsledku nazývame *Laplaceov rozvoj determinantu matice  $A$  podľa  $i$ -tého riadku*, druhú *Laplaceov rozvoj podľa  $j$ -tého stĺpca*.

**Príklad 6.3.4.** Nasledujúci determinant vypočítame Laplaceovým rozvojom podľa druhého stĺpca.

$$\begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & -1 & 2 \end{vmatrix} = -2 \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 2 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 2 & -1 & 2 \end{vmatrix} = (-2) \cdot 1 - 3 \cdot (-1) = 1$$

### 6.3.2 Výpočet pomocou riadkových a stĺpcových operácií

V časti 5.2 sme si ukázali, ako možno pomocou elementárnych riadkových úprav upraviť ľubovoľnú maticu na redukovanú trojuholníkovú maticu. Ak by sme vedeli, ako elementárne riadkové úpravy ovplyvňujú hodnotu determinantu a ak by sme vedeli vypočítať determinant redukovanej trojuholníkovej matice, tak by sme získali ďalšiu metódu na výpočet determinantov. Práve to je naším najbližším cieľom.

Začneme s tým, že overíme, ako menia hodnotu determinantu jednotlivé elementárne riadkové operácie.

**Veta 6.3.5.** Ak maticu  $B$  získame z  $A$  vynásobením  $k$ -teho riadku skalárom  $c \in F$ , tak

$$|B| = c|A|.$$

*Dôkaz.* Označme  $B = \|b_{ij}\|$  a  $A = \|a_{ij}\|$ . Potom platí  $b_{ij} = a_{ij}$  pre  $i \neq k$  a  $b_{kj} = ca_{kj}$ . Priamo z definície determinantu potom dostaneme

$$\begin{aligned} |B| &= \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} b_{1,\varphi(1)} b_{2,\varphi(2)} \cdots b_{k-1,\varphi(k-1)} b_{k,\varphi(k)} b_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots b_{n,\varphi(n)} = \\ &= \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1,\varphi(1)} a_{2,\varphi(2)} \cdots a_{k-1,\varphi(k-1)} ca_{k,\varphi(k)} a_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots a_{n,\varphi(n)} = \\ &= c \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1,\varphi(1)} a_{2,\varphi(2)} \cdots a_{k-1,\varphi(k-1)} a_{k,\varphi(k)} a_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots a_{n,\varphi(n)} = c|A|. \end{aligned}$$

□

**Dôsledok 6.3.6.** Ak matica  $A$  má nulový riadok, tak  $|A| = 0$ .

*Dôkaz.* Stačí v predchádzajúcej vete dosadiť  $c = 0$ .

□

**Veta 6.3.7.** Ak má matica  $A$  dva rovnaké riadky, tak  $|A| = 0$ .

*Dôkaz.* Matematickou indukciou vzhľadom na  $n$ .

1° Pre  $n = 2$  tvrdenie platí:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{11} & a_{12} \end{vmatrix} = a_{11}a_{12} - a_{11}a_{12} = 0.$$

2° Predpokladajme, že tvrdenia platí pre ľubovoľnú maticu typu  $n \times n$ . Nech  $A$  je matica typu  $(n+1) \times (n+1)$ , ktorej  $i$ -ty a  $j$ -ty riadok sú rovnaký. Ak urobíme rozvoj determinantu matice  $A$  podľa niektorého iného riadku (okrem  $i$ -teho a  $j$ -teho), tak všetky matice  $M_{rs}$  vystupujúce v Laplaceovom rozvoji sú matice typu  $n \times n$  a majú dva rovnaké riadky. Podľa indukčného predpokladu  $|M_{rs}| = 0$  pre všetky prípustné hodnoty  $r, s$ , a teda z Laplaceovho rozvoja (6.2) vidíme, že aj  $|A| = 0$ . □

**Veta 6.3.8.** Nech matice  $A$  a  $B$  sú matice typu  $n \times n$ , ktoré sa líšia len v  $k$ -tom riadku. Potom  $|A| + |B| = |C|$ , kde  $c_{ij} = a_{ij} = b_{ij}$  pre  $i \neq k$  a  $c_{kj} = a_{kj} + b_{kj}$ .

*Dôkaz.* Urobme rozvoj matice  $C$  podľa  $k$ -teho riadku. Dostaneme

$$|C| = (-1)^{k+1}(a_{k1} + b_{k1})|M_{k1}| + (-1)^{k+2}(a_{k2} + b_{k2})|M_{k2}| + \cdots + (-1)^{k+n}(a_{kn} + b_{kn})|M_{kn}|.$$

Pritom podmatice  $M_{k1}, M_{k2}, \dots, M_{kn}$  už pozostávajú len z tých prvkov, ktoré sú vo všetkých troch maticiach rovnaké. Teda tie isté podmatice budú vystupovať v rozvojoch matíc  $A$  a  $B$  podľa  $k$ -teho riadku. Pomocou nich dostaneme:

$$\begin{aligned} |A| &= (-1)^{k+1}a_{k1}|M_{k1}| + (-1)^{k+2}a_{k2}|M_{k2}| + \cdots + (-1)^{k+n}a_{kn}|M_{kn}|, \\ |B| &= (-1)^{k+1}b_{k1}|M_{k1}| + (-1)^{k+2}b_{k2}|M_{k2}| + \cdots + (-1)^{k+n}b_{kn}|M_{kn}|. \end{aligned}$$

Sčítaním týchto dvoch rovností a porovnaním s rozvojom determinantu matice  $C$  dostaneme

$$|A| + |B| = |C|.$$

□

Predchádzajúcu vetu by sme mohli ľahko overiť aj priamo na základe definície determinantu.

*Dôkaz.*

$$\begin{aligned}
|C| &= \sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} c_{1\varphi(1)} \cdots c_{k-1,\varphi(k-1)} c_{k\varphi(k)} c_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots c_{n\varphi(n)} = \\
&\sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)} \cdots a_{k-1,\varphi(k-1)} (a_{k\varphi(k)} + b_{k\varphi(k)}) a_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots a_{n\varphi(n)} = \\
&\sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)} \cdots a_{k-1,\varphi(k-1)} a_{k\varphi(k)} a_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots a_{n\varphi(n)} + \\
&\sum_{\varphi \in S_n} (-1)^{i(\varphi)} a_{1\varphi(1)} \cdots a_{k-1,\varphi(k-1)} b_{k\varphi(k)} a_{k+1,\varphi(k+1)} \cdots a_{n\varphi(n)} = |A| + |B|
\end{aligned}$$

□

**Veta 6.3.9.** *Ak matica  $B$  vznikne z  $A$  pripočítaním  $c$ -násobku niektorého riadku  $k$  inému (pričom  $c \in F$ ), tak  $|B| = |A|$ .*

*Dôkaz.* Nech  $B$  vznikne z  $A$  pripočítaním  $c$ -násobku  $k$ -teho riadku k  $l$ -temu riadku, pričom  $k \neq l$ . Teda  $B$  má všetky riadky rovnaké ako matica  $A$ , len prvky  $l$ -teho riadku majú tvar  $b_{lj} = ca_{kj} + a_{lj}$ .

Nech  $A'$  je matica, ktorá má všetky riadky rovnaké ako matica  $A$  len  $l$ -ty riadok matice  $A'$  sa rovná  $k$ -temu riadku matice  $A$ . (Teda  $a'_{ij} = a_{ij}$  pre  $i \neq l$  a  $a'_{lj} = a_{kj}$ .) Táto matica má dva rovnaké riadky, teda podľa vety 6.3.7 je  $|A'| = 0$ .

Uvažujme ďalej maticu  $A''$ , ktorá vznikne z  $A'$  vynásobením  $k$ -teho riadku skalárom  $c$ . (Teda  $a''_{ij} = a_{ij}$  pre  $i \neq l$  a  $a''_{lj} = ca_{kj}$ .) Z vety 6.3.5 máme  $|A''| = c|A'| = 0$ .

Teraz si stačí všimnúť, že maticu  $B$  dostaneme z matic  $A$  a  $A''$  spôsobom popísaným vo vete 6.3.8. Teda

$$|B| = |A| + |A''| = |A|.$$

□

**Veta 6.3.10.** *Ak matica  $B$  vznikne z  $A$  vzájomnou výmenou dvoch riadkov, tak  $|B| = -|A|$ . (Výmena 2 riadkov matice mení znamienko determinantu.)*

*Dôkaz.* Označme  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$  riadky matice  $A$ . Uvažujme maticu, ktorá má rovnaké riadky ako  $A$ , len namiesto  $i$ -teho aj namiesto  $j$ -teho riadku má  $\vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j$ . Pretože táto matica má rovnaký  $i$ -ty a  $j$ -ty riadok, podľa vety 6.3.7

$$\begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} = 0$$

(Kvôli stručnosti označenia sme vynechali sme všetky riadky, ktoré sú rovnaké ako v matici  $A$ , okrem prvého a posledného. Toto označenie rozhodne nie je korektné, snáď je však dostatočne zrozumiteľné.)

Tento determinant súčasne vieme prepísať pomocou vety 6.3.8 a vety 6.3.7

$$\begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i + \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_i \\ \vec{\alpha}_j \\ \vec{\alpha}_n \end{vmatrix}$$

Porovnaním týchto 2 vzťahov dostaneme

$$0 = |A| + |B|,$$

čiže skutočne  $|B| = -|A|$ . □

Teraz už vieme, ako ovplyvňujú hodnotu determinantu jednotlivé elementárne riadkové operácie. Podľa vety 6.2.6 platí  $|A| = |A^T|$ . Pretože riadkové operácie použité na transponovanú maticu  $A^T$  zodpovedajú stĺpcovým operáciám na pôvodnej matici  $A$ , všetky dokázané tvrdenia platia aj pre stĺpcové operácie. (Pri výpočte determinantov môžeme teda kombinovať riadkové aj stĺpcové operácie.)

Doteraz dokázané vety nám však len umožňujú porovnať determinant danej matice s determinantom redukovanej trojuholníkovej matice, ktorú dostaneme. Aby sme mohli túto metódu naozaj použiť na výpočet determinantu, potrebujeme ešte vedieť určiť determinant matice, ktorá je v redukovanom trojuholníkovom tvare. Na to nám poslúžia nasledujúce dva výsledky.

**Veta 6.3.11.** *Ak  $A$  je horná trojuholníková matica (pod hlavnou diagonálou má nuly), tak determinant matice  $A$  sa rovná súčinnu prvkov na diagonále.*

$$|A| = a_{11}a_{22} \dots a_{nn}$$

*Dôkaz.* Stačí ukázať, že pre každú permutáciu  $\varphi \in S_n$  okrem identickej permutácie je súčin  $a_{1\varphi(1)}a_{2\varphi(2)} \dots a_{n\varphi(n)}$  nulový. Na to stačí, aby bol nulový niektorý činiteľ  $a_{i\varphi(i)}$ . Pretože predpokladáme, že  $A$  je horná trojuholníková matica, určite platí  $a_{i\varphi(i)} = 0$  pre  $i > \varphi(i)$ . Zostáva nám teda ukázať, že aspoň jedno také  $i$  existuje.

Ak  $\varphi \in S_n$  a  $\varphi \neq id$ , tak existuje  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  také, že  $i \neq \varphi(i)$ . Nech  $i$  je najväčšie také číslo, čiže  $i = \max\{k; \varphi(k) \neq k\}$ . Označme  $j = \varphi(i)$ . Nemôže platiť  $\varphi(j) = j$ , lebo potom by sa na  $j$  zobrazili 2 rôzne prvky, čo je v spore s predpokladom, že  $\varphi$  je bijekcia. Teda platí  $i > j = \varphi(i)$ . □

**Dôsledok 6.3.12.** *Determinant diagonálnej matice sa rovná súčinnu diagonálnych prvkov.*

$$\begin{vmatrix} d_1 & & \\ & \ddots & \\ & & d_n \end{vmatrix} = d_1 d_2 \dots d_n$$

**Príklad 6.3.13.** Vypočítajme determinant z príkladu 6.3.4 tentokrát použitím riadkových a stĺpcových úprav.

$$\begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & -1 & 2 \end{vmatrix} \stackrel{(1)}{=} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(2)}{-} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(3)}{-} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(4)}{-} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(5)}{-} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(6)}{=} \begin{vmatrix} 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(7)}{=} \\ \begin{vmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(8)}{=} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \stackrel{(9)}{=} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

Elementárne riadkové a stĺpcové operácie, ktoré sme použili sú:

- (1) 3. stĺpec sme pripočítali k prvému a štvrtému stĺpcu
- (2) 2. riadok sme vynásobili  $-1$
- (3) odčítali sme druhý riadok od tretieho a pripočítali sme ho k štvrtému
- (4) odpočítali sme 1. riadok od tretieho
- (5) odpočítali sme 4. riadok od tretieho
- (6) výmena druhého a tretieho riadku
- (7) odpočítali sme 2-násobok 2. riadku od prvého

(8) odpočítali sme 4. riadok od prvého

(9) odčítali sme 1. riadok od štvrtého

Asi najviac si zjednodušíme prácu, ak budeme kombinovať oba postupy – riadkové a stĺpcové úpravy aj Laplaceov rozvoj. Napríklad namiesto kroku (2) alebo (3) v predchádzajúcom postupe sme mohli použiť Laplaceov rozvoj podľa 2. riadku a dostali by sme sa tak k determinantu  $3 \times 3$ .

**Poznámka 6.3.14.** Všetky výsledky, ktoré sme odvodili pre zmeny determinantu pri elementárnych riadkových úpravách zodpovedajú geometrickej intuícii, ktorú sme spomínali – že determinant môžeme chápať (až na znamienko) ako objem.

Konkrétne vynásobenie niektorého riadku konštantou znamená  $c$ -násobné natiahnutie rovnobežnostena v smere niektorej z jeho hrán, pričom sa aj objem zväčší  $c$ -krát. Podobne pripočítanie násobku  $i$ -teho riadku k  $j$ -temu predstavuje vlastne skosenie rovnobežnostena v smere  $i$ -tej hrany. Pri ňom sa nemení objem. (Podobne – snáď ešte jednoduchšie – si môžete rozmyslieť, že to funguje pre dvojrozmerný rovnobežník.)

**Veta 6.3.15.** *Nech  $A$  je štvorcová matica typu  $n \times n$ . Matica  $A$  je regulárna práve vtedy, keď  $|A| \neq 0$ .*

*Dôkaz.* Pripomeňme, že matica  $A$  je regulárna práve vtedy, keď hodnosť matice je  $n$ . Vieme, že hodnosť matice sa rovná počtu nenulových riadkov v redukovanej trojuholníkovej matici  $M$ , ktorá je riadkovo ekvivalentná s  $A$ .

Ak matica  $A$  nie je regulárna, tak príslušná redukovaná trojuholníková matica má aspoň jeden nulový riadok. Podľa dôsledku 6.3.6 má teda nulový determinant. Ako sme dokázali v predchádzajúcich vetách, žiadna z elementárnych riadkových úprav nemení nulovosť a nenulovosť determinantu. Preto aj determinant matice  $A$  je nulový.

Ak  $A$  je regulárna, tak príslušná redukovaná trojuholníková matica má  $n$  nenulových riadkov. Pretože ide o maticu typu  $n \times n$ , priamo z definície redukovanej trojuholníkovej matice vyplýva, že to je jednotková matica  $I_n$ , ktorá má nenulový determinant  $|I_n| = 1$ .  $\square$

Teraz, keď už vieme, že sú pre nás podstatné len regulárne matice, mohli by sme vetu 6.3.11 a dôsledok 6.3.12 odvodiť v opačnom poradí. Priamy dôkaz dôsledku 6.3.12 by sa podobal na dôkaz vety 6.3.11, bol by však jednoduchší v tom, že teraz už máme nuly aj nad diagonálou a nepotrebujeme hľadať  $i$  také, že  $i > \varphi(i)$ . (Stačí nám, že  $i \neq \varphi(i)$ .) Akonáhle už máme dokázaný dôsledok 6.3.12 a chceme overiť vetu 6.3.11 pre regulárnu hornú trojuholníkovú maticu, stačí si uvedomiť, že takúto maticu vieme upraviť na diagonálnu už len používaním pripočítavania niektorého riadku k inému a pri tejto úprave sa hodnota determinantu nemení (veta 6.3.9).

## 6.4 Determinant súčinu matíc

Teraz dokážeme ešte jeden dôležitý výsledok týkajúci sa determinantov. Stručne povedané, tento výsledok hovorí, že determinant súčinu matíc sa rovná súčinu determinantov.

**Veta 6.4.1.** *Nech  $A, B$  sú dve matice typu  $n \times n$  nad poľom  $F$ . Potom platí*

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

*Dôkaz.* Označme riadky matice  $A$  ako  $\vec{\alpha}_1, \dots, \vec{\alpha}_n$ . Teda

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_2 \\ \vdots \\ \vec{\alpha}_n \end{pmatrix}$$

Priamo z definície súčinu matíc (rozmyslite si to!) sa dá zistiť, že riadky matice  $AB$  majú tvar  $\vec{\alpha}_k B$ , čiže

$$AB = \begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 B \\ \vec{\alpha}_2 B \\ \vdots \\ \vec{\alpha}_n B \end{pmatrix}$$

Pretože  $\vec{\alpha}_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} \vec{e}_i$ , môžeme túto rovnosť upraviť na tvar

$$AB = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n a_{1i} \vec{e}_i B \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n a_{ni} \vec{e}_i B \end{pmatrix}$$

Pomocou viacnásobného použitia vety 6.3.8 postupne dostaneme

$$|AB| = \sum_{i_1=1}^n a_{1i_1} \begin{vmatrix} \vec{e}_{i_1} B \\ \sum_{i_2=1}^n a_{2i_2} \vec{e}_{i_2} B \\ \vdots \\ \sum_{i_n=1}^n a_{ni} \vec{e}_i B \end{vmatrix} = \dots = \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_n=1}^n a_{1i_1} a_{2i_2} \dots a_{ni_n} \begin{vmatrix} \vec{e}_{i_1} B \\ \vec{e}_{i_2} B \\ \vdots \\ \vec{e}_{i_n} B \end{vmatrix}$$

Teraz si uvedomme, že ak  $i_j = i_k$  pre nejaké  $j \neq k$ , tak príslušný determinant v predchádzajúcej sume je nulový (lebo má 2 rovnaké riadky). Teda nenulové sčítance budú iba tie, kde  $n$ -tica  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  predstavuje permutáciu čísel  $1, \dots, n$ . Dostávame teda

$$|AB| = \sum_{\varphi \in S_n} a_{1\varphi(1)} a_{2\varphi(2)} \dots a_{n\varphi(n)} \begin{vmatrix} \vec{e}_{\varphi(1)} B \\ \vec{e}_{\varphi(2)} B \\ \vdots \\ \vec{e}_{\varphi(n)} B \end{vmatrix}$$

Matica vystupujúca v predchádzajúcej rovnosti je vlastne matica  $B$  s poprehadzovanými riadkami. Pomocou výmen niektorých riadkov z nej vieme dostať maticu  $B$ . O chvíľu si ukážeme, že sa to dá urobiť pomocou  $i(\varphi)$  výmen. Na základe toho prejde predchádzajúca rovnosť na tvar

$$|AB| = \sum_{\varphi \in S_n} a_{1\varphi(1)} a_{2\varphi(2)} \dots a_{n\varphi(n)} (-1)^{i(\varphi)} |B| = |A| \cdot |B|.$$

Zostáva nám teda overiť, že potrebný počet výmen je skutočne  $i(\varphi)$ . Pri upravovaní „poprehadzovanej matice na maticu“  $B$  môžeme postupovať tak, že najprv premiestníme prvý riadok na prvé miesto a to tak, že ho vždy vymieňame s predchádzajúcim, až kým sa nedostane na správnu pozíciu. (Ak už je na prvom mieste, nerobíme žiadne výmeny.) Takto sme urobili toľko výmen riadkov, koľko má permutácia  $\varphi$  inverzií obsahujúcich číslo 1. Teraz môžeme podobným spôsobom presunúť druhý riadok na druhé miesto. Počet výmen je rovnaký ako počet tých inverzií, ktoré obsahujú 2 ale nie 1 (pretože prvý riadok sme už presunuli). Takto postupujeme ďalej. Vidíme, že pri takomto algoritme dostaneme maticu  $B$  pomocou presne  $i(\varphi)$  výmen riadkov.  $\square$

Dôkaz, ktorý sme uviedli, je v princípe rovnaký ako v [A, Theorem 10.31]. V [K, Veta 6.2.18] môžete nájsť dôkaz, ktorý využíva rozloženie matice na súčin redukovanej trojuholníkovej matice a matic elementárnych riadkových operácií. Ešte jeden, úplne iný dôkaz, môžete nájsť v [KGGs, Veta 2.14.7].

Hovorili sme o tom, že ako geometrický význam determinantu si môžeme predstaviť objem rovnobežnostena určeného riadkami matice. V prípade, že danú maticu chápeme ako maticu lineárneho zobrazenia, je to presne objem rovnobežnostena na ktorý sa zobrazí jednotková kocka (určená vektormi štandardnej bázy). Determinant nám teda hovorí, koľkokrát sa pri zobrazení daným lineárnym zobrazením zväčší objem jednotkovej kocky. Pretože ide o lineárne zobrazenie, aj objem ľubovoľného rovnobežnostena sa zväčší v rovnakom pomere. A presne toto tvrdenie vlastne hovorí veta, ktorú sme práve dokázali. (V poznámke 6.3.14 sme hovorili o súvisi medzi touto geometrickou predstavou a elementárnymi riadkovými operáciami. Spomínaný dôkaz z [K] teda vlastne zodpovedá tejto geometrickej intuícii – ľubovoľné lineárne zobrazenie sme najprv rozložili na jednoduchšie zobrazenia, o ktorých vieme ukázať koľkokrát zväčšujú objem. Pomocou toho vieme určiť, koľkokrát sa zväčší objem pri použití pôvodného zobrazenia.)

## 6.5 Využitie determinantov

### 6.5.1 Výpočet inverznej matice

**Veta 6.5.1.** Ak  $A$  je regulárna matica typu  $n \times n$ , tak

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

kde  $A_{ij}$  označuje algebraický doplnok prvku  $a_{ij}$ .

**Poznámka 6.5.2.** Maticu

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

nazývame *adjungovaná matica* k matici  $A$  a označuje  $\text{adj } A$ . Teda vyjadrenie inverznej matice z predchádzajúcej vety môžeme zapísať aj v tvare

$$A^{-1} = \frac{\text{adj } A}{|A|}.$$

POZOR na výmenu poradia indexovania – algebraické doplnky v adjungovanej matici nie sú indexované tak, ako v pôvodnej matici ale podobným spôsobom ako v transponovanej matici.

*Dôkaz.* Treba dokázať, že  $A \cdot \frac{\text{adj}(A)}{|A|} = I$ . Označme maticu  $A \cdot \frac{\text{adj}(A)}{|A|}$  ako  $C$ . Pre jej prvky platí

$$c_{ij} = \frac{1}{|A|} \sum_{k=1}^n a_{ik} A_{jk}.$$

Potrebuje vlastne ukázať, že  $c_{ii} = 1$  a  $c_{ij} = 0$  pre  $i \neq j$ .

Pre  $i = j$  dostávame

$$c_{ii} = \frac{1}{|A|} \sum_{k=1}^n a_{ik} A_{ik}.$$

Suma v predchádzajúcej rovnosti je presne rozvoj matice  $A$  podľa  $i$ -teho riadku, čiže sme dostali  $c_{ii} = \frac{|A|}{|A|} = 1$ .

Pre  $i \neq j$  si všimneme, že suma vo výraze

$$c_{ij} = \frac{1}{|A|} \sum_{k=1}^n a_{ik} A_{jk}.$$

predstavuje Laplaceov rozvoj matice, ktorá vznikne z  $A$  nahradením  $j$ -teho riadku  $i$ -tým, podľa (nového)  $j$ -teho riadku. Pretože táto matica má dva riadky rovnaké, jej determinant je nulový, z čoho  $c_{ij} = 0$ .  $\square$

V predchádzajúcom dôkaze sme overili pre maticu  $B = \frac{\text{adj}(A)}{|A|}$  rovnosť  $AB = I$ . V definícii inverznej matice však vystupuje aj rovnosť  $BA = I$ . Nie je to chyba? Zabudli sme ju overiť?

Nie, nie je to chyba. V predpokladoch vety totiž máme, že  $A$  je regulárna, teda  $A^{-1}$  existuje. Vďaka tomu z rovnosti  $AB = I$  po vynásobení  $A^{-1}$  dostaneme  $B = A^{-1}$ . (A navyše z poznámky 5.5.8 vieme, že nám stačí overiť iba jednu z týchto dvoch rovností.)

**Príklad 6.5.3.** Nech  $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 2 \end{pmatrix}$ . Priamym výpočtom dostaneme  $|A| = 1$  a  $\text{adj } A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -2 \\ -2 & 0 & 1 \\ -4 & -1 & 3 \end{pmatrix}$ .

Z toho dostávame, že

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \text{adj } A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -2 \\ -2 & 0 & 1 \\ -4 & -1 & 3 \end{pmatrix}.$$

Vynásobením matíc sa môžeme presvedčiť, že skutočne platí  $A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = I$ .

**Poznámka 6.5.4.** Práve odvodený vzorec pre inverznú maticu bude veľmi jednoduchý v prípade, že pracujeme s maticou veľkosti  $2 \times 2$ . Vtedy totiž všetky podmatice vystupujúce v algebraických doplnkoch sú typu  $1 \times 1$ , čiže jediná hodnota v takejto matici je priamo rovná determinantu.

Konkrétne pre maticu

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

dostaneme  $A_{11} = a_{22}$ ,  $A_{12} = -a_{21}$ ,  $A_{21} = -a_{12}$  a  $A_{22} = a_{11}$ . Ak to dosadíme do vzorca pre inverznú maticu, máme

$$A^{-1} = \frac{1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{pmatrix} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{pmatrix}.$$

Ľahko môžete priamy výpočtom skontrolovať, že súčin týchto dvoch matíc skutočne dáva jednotkovú maticu. A je to vzorec, ktorý sa vcelku ľahko zapamätá. (Vlastne sme len prvky na diagonále vymenili a pri prvkoch mimo diagonály zmenili znamienko. Takto upravenú maticu sme vydělili determinantom.)



### 6.5.2 Cramerovo pravidlo

Na začiatku kapitoly sme si ukázali, ako sa dá pomocou determinantu vyjadriť riešenie sústavy 2 lineárne nezávislých rovníc o 2 neznámých. Teraz odvodíme analogický výsledok pre sústavu  $n$  rovníc s  $n$  neznámymi.

Majme sústavu

$$\left( \begin{array}{cccc|c} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & c_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & c_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & c_n \end{array} \right)$$

Označme maticu sústavy ako  $A$  a  $C := (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$  maticu, v ktorej sú do stĺpca zapísané prave strany. Hľadáme vlastne takú maticu  $X$ , pre ktorú platí

$$AX = C.$$

Ak je matica  $A$  regulárna, vynásobením  $A^{-1}$  zľava dostaneme

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A^{-1}C = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$$

Z predchádzajúcej rovnosti dostaneme

$$x_i = \frac{1}{|A|} \sum_{j=1}^n A_{ji}c_j.$$

Nech  $A_i$  označuje maticu, ktorú dostaneme ak v matici  $A$  nahradíme  $i$ -ty stĺpec stĺpcom  $(c_1, c_2, \dots, c_n)^T$  (čiže pravými stranami). Potom si môžeme všimnúť, že výraz vystupujúci v predchádzajúcej rovnosti je presne Laplaceov rozvoj matice  $A_i$  podľa  $i$ -teho stĺpca. (Iné stĺpce sme nemenili, preto algebraické doplnky vystupujúce v Laplaceovom rozvoji sú rovnaké ako pre maticu  $A$ .) Platí teda

$$|A_i| = \sum_{j=1}^n A_{ji}c_j,$$

z čoho dostaneme

$$x_i = \frac{|A_i|}{|A|}.$$

Tým sme odvodili vzorec pre riešenia sústavy lineárnych rovníc, ktorá má regulárnu maticu. Tento vzorec sa nazýva *Cramerovo pravidlo*.

**Príklad 6.5.5.** Majme sústavu  $\left( \begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & -1 & 2 & 3 \end{array} \right)$ . V príklade 6.5.3 sme vypočítali determinant  $|A| = 1$ .

Ostatné determinanty, ktoré potrebujeme na použitie Cramerovho pravidla sú

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 3 & -1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = -2 + 1 = -1$$

(Úprava, ktorú sme použili, bolo odčítanie prvých dvoch riadkov od tretieho.)

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 2 - 1 = 1$$

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & -1 & 3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 1 + 2 = 3$$

Z toho dostaneme riešenie sústavy  $(-1, 1, 3)$ .

**Príklad 6.5.6.** V príklade 4.4.21 sme dokázali, že  $F = \{a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2}; a, b, c \in \mathbb{Q}\}$  je pole. Podme sa pozrieť na to, či by sme vedeli nájsť vzorec, ktorý určuje inverzný prvok k danému prvku z  $F$ . Chceme teda pre dané  $a, b, c \in \mathbb{Q}$  nájsť také racionálne čísla  $x, y, z$ , aby platilo

$$(a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2})(x + y\sqrt[3]{2} + z\sqrt[3]{2^2}) = 1.$$

Najprv, ako prípravu na samotný výpočet, si všimnime, že  $a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2} = 0$  platí práve vtedy, keď  $a = b = c = 0$ . Môžeme to ukázať sporom.

Predpokladajme, že by platilo  $a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2} = 0$  a aspoň jedno z čísel  $a, b, c$  by bolo nenulové. Ak  $c = 0$  tak vieme z tejto rovnosti ukázať, že buď  $a = b = 0$  (čiže všetky tri čísla by boli nulové), alebo  $\sqrt[3]{2} = -a/b$ . Čiže by sme dostali, že  $\sqrt[3]{2}$  je racionálne číslo, čo je spor.

Ak  $c \neq 0$ , tak vieme dostať rovnosť tvaru

$$\sqrt[3]{2^2} = e + f\sqrt[3]{2},$$

kde  $e$  aj  $f$  sú racionálne čísla. Vynásobením tejto rovnice číslom  $\sqrt[3]{2}$  dostaneme

$$\begin{aligned} 8 &= e\sqrt[3]{2} + f\sqrt[3]{2^2} = e\sqrt[3]{2} + f(e + f\sqrt[3]{2}) = (e + f^2)\sqrt[3]{2} + ef \\ 8 - ef &= (e + f^2)\sqrt[3]{2} \end{aligned}$$

Ak je ľavá strana nenulová, tak opäť vieme ukázať, že  $\sqrt[3]{2}$  je racionálne číslo a dostaneme spor. Ak je nulová, tak máme  $8 = ef$  a  $e + f^2 = 0$ . Z toho dostaneme  $f^3 = -8$ , jediné racionálne riešenie je  $f = -2$ . Súčasne máme  $e = -f^2 = -4$ . Teda v rovnosti  $\sqrt[3]{2^2} = e + f\sqrt[3]{2}$  máme na ľavej strane kladné číslo a na pravej strane záporné číslo, čiže sme opäť dostali spor.

Z toho, čo sme si práve ukázali, vyplýva aj implikácia  $a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2} = a' + b'\sqrt[3]{2} + c'\sqrt[3]{2^2} \Rightarrow a = a', b = b', c = c'$ .

Teraz už máme pripravené všetko na to, aby sme sa pustili do hľadania inverzného prvku.

Chceli by sme, aby platilo  $(a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2})(x + y\sqrt[3]{2} + z\sqrt[3]{2^2}) = 1$ . Ľavú stranu tejto rovnosti môžeme upraviť ako

$$(a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2})(x + y\sqrt[3]{2} + z\sqrt[3]{2^2}) = (ax + 2cy + 2bz) + (bx + ay + 2cz)\sqrt[3]{2} + (cx + by + az)\sqrt[3]{2^2}.$$

Dostávame teda, že musia platiť tieto rovnosti:

$$\begin{aligned} ax + 2cy + 2bz &= 0 \\ bx + ay + 2cz &= 0 \\ cx + by + az &= 0 \end{aligned}$$

Toto je vlastne sústava lineárnych rovníc s neznámymi  $x, y, z$ , v prípade, že determinant matice sústavy je nenulový, tak bude mať jediné riešenie, ktoré budeme vedieť vyjadriť na základe Cramerovho pravidla. Vyrátajme teda najprv determinant matice sústavy:

$$\begin{vmatrix} a & 2c & 2b \\ b & a & 2c \\ c & b & a \end{vmatrix} = a^3 + 2b^3 + 4c^3 - 6abc.$$

Ak chceme použiť Cramerovo pravidlo mali by sme sa najprv presvedčiť o tom, že tento determinant je nenulový. Riešime teda vlastne otázku, či pre  $a, b, c \in \mathbb{Q}$  môže nastať rovnosť  $a^3 + 2b^3 + 4c^3 - 6abc = 0$ . Chceme ukázať, že to môže nastať iba pre  $a = b = c = 0$ .

Zdôvodnenie tohoto faktu nie je úplne jednoduché. Môžeme to urobiť napríklad takto: Označme  $u = a$ ,  $v = b\sqrt[3]{2}$ ,  $w = c\sqrt[3]{2^2}$ . Po tejto substitúcii prejde naša rovnosť do tvaru

$$u^3 + v^3 + w^3 - 3uvw = 0.$$

Ďalej použijeme rozklad

$$u^3 + v^3 + w^3 - 3uvw = (u+v+w)(u^2 + v^2 + w^2 - uv - uw - vw) = \frac{1}{2}(u+v+w)((u-v)^2 + (v-w)^2 + (w-u)^2).$$

(Táto rovnosť sa ľahko overí priamym výpočtom, objaviť ju ale nie je úplne jednoduché.)

Ak sme overili predošlú rovnosť, tak už vieme, že náš výraz sa bude rovnať nule iba ak  $u + v + w = 0$  alebo  $(u - v)^2 + (v - w)^2 + (w - u)^2 = 0$ . V prvom prípade dostávame  $u + v + w = a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2} = 0$ . Už sme overili, že to nastane iba ak  $a = b = c = 0$ . V druhom prípade by sa mal rovnať nule súčet troch nezáporných reálnych čísel, čo znamená, že  $u - v = v - w = w - u = 0$ , a teda  $u = v = w$ . Potom dostávame  $a = \sqrt[3]{2}b = c\sqrt[3]{2^2}$  a ak sú  $a, b, c$  nenulové tak dostaneme, že  $\sqrt[3]{2}$  je racionálne, čo je spor.

Podarilo sa nám teda ukázať, že uvedený determinant je pre racionálne čísla  $a, b, c$  nenulový. Ak teraz použijeme Cramerovo pravidlo, dostaneme

$$x = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 2c & 2b \\ 0 & a & 2c \\ 0 & b & a \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a & 2c & 2b \\ b & a & 2c \\ c & b & a \end{vmatrix}} = \frac{a^2 - 2bc}{a^3 + 2b^3 + 4c^3 - 6abc}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a & 1 & 2b \\ b & 0 & 2c \\ c & 0 & a \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a & 2c & 2b \\ b & a & 2c \\ c & b & a \end{vmatrix}} = \frac{2c^2 - ab}{a^3 + 2b^3 + 4c^3 - 6abc}$$

$$z = \frac{\begin{vmatrix} a & 2c & 1 \\ b & a & 0 \\ c & b & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a & 2c & 2b \\ b & a & 2c \\ c & b & a \end{vmatrix}} = \frac{b^2 - ac}{a^3 + 2b^3 + 4c^3 - 6abc}$$

Priamym výpočtom sa dá skontrolovať, že  $x + y\sqrt[3]{2} + z\sqrt[3]{2^2}$  je skutočne inverzný prvok k prvku  $a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2^2}$ .

**Príklad 6.5.7.** Ešte sa pozrime na to, že rovnosť

$$u^3 + v^3 + w^3 - 3uvw = (u + v + w)(u^2 + v^2 + w^2 - uv - uw - vw),$$

ktorú sme použili v predošlom príklade, sa dá odvodiť pomocou determinantov. Platí:

$$\begin{aligned} u^3 + v^3 + w^3 - 3uvw &= \begin{vmatrix} u & v & w \\ w & u & v \\ v & w & u \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} u & v & w \\ w & u & v \\ u+v+w & u+v+w & u+v+w \end{vmatrix} = \\ &= (u+v+w) \begin{vmatrix} u & v & w \\ w & u & v \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = (u+v+w)(u^2 + v^2 + w^2 - uv - uw - vw) \end{aligned}$$

Viacere ďalšie aplikácie tejto faktorizácie sú spomenuté napríklad v článku [M].

## Cvičenia

**Úloha 6.5.1.** Vypočítajte determinanty:  $\begin{vmatrix} -2 & 3 & -3 & -1 \\ 1 & -2 & 3 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -2 \end{vmatrix}$ ,  $\begin{vmatrix} -2 & 3 & -2 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \end{vmatrix}$ ,  $\begin{vmatrix} -2 & 3 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$

Ak existuje inverzná matica, aký bude jej determinant. Výsledky (bez záruky): 0, -8, 8.

**Úloha 6.5.2.** Vyriešte v  $\mathbb{Z}_5$  pomocou Cramerovho pravidla:  $\begin{pmatrix} 3 & 4 & 0 & | & 1 \\ 1 & 1 & 2 & | & 1 \\ 3 & 4 & 1 & | & 0 \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 4 & | & 1 \\ 0 & 1 & 2 & | & 2 \\ 1 & 0 & 3 & | & 3 \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & | & 1 \\ 0 & 1 & 1 & | & 1 \\ 2 & 1 & 3 & | & 2 \end{pmatrix}$

**Úloha 6.5.3.** Pomocou Cramerovho pravidla riešte:

$$\begin{array}{cccccc} x_1 & +5x_2 & +4x_3 & +3x_4 & = & 1 & x_1 & +2x_2 & +x_3 & = & 1 \\ 2x_1 & -x_2 & +2x_3 & -x_4 & = & 0 & 2x_1 & +x_2 & -x_3 & = & 0 \end{array}$$

(Návod: Skúste zvoliť  $x_3, x_4$  za parametre.)

**Úloha 6.5.4.** Určte determinanty daných matíc. Viete na základe výsledku určiť ich hodnotu pre niektoré hodnoty  $c \in \mathbb{R}$ ?

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & c-1 \\ c-2 & 1 & 0 \\ c & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 1 & 1 & c-1 \\ c-2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & c \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 2 & c+1 & 0 \\ 2 & c-1 & 2c \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

**Úloha 6.5.5.** Nájdite inverznú maticu k maticiam z úlohy 5.5.2 pomocou determinantu.

**Úloha 6.5.6.** Vypočítajte inverznú maticu:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & -1 \\ 1 & 4 & 9 & 1 \\ 1 & 8 & 27 & -1 \end{pmatrix}$$

**Úloha 6.5.7.** Ukážte, že v ľubovoľnom poli platí  $x + y + z = 0 \Rightarrow x^3 + y^3 + z^3 - 3xyz = 0$ . Skúste sa zamyslieť nad tým, či to viete odvodiť použitím vhodného determinantu.

**Úloha 6.5.8\*.** 
$$\begin{vmatrix} 1 & a_1 & a_1^2 & \dots & a_1^n \\ 1 & a_2 & a_2^2 & \dots & a_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a_n & a_n^2 & \dots & a_n^n \\ 1 & a_{n+1} & a_{n+1}^2 & \dots & a_{n+1}^n \end{vmatrix} = ?$$

[Výsledok by mal byť  $\prod_{1 \leq i < j \leq n+1} (a_j - a_i)$ , t.j. súčin výrazov tvaru  $a_j - a_i$  pre všetky  $i < j$ .]

**Úloha 6.5.9\*.** 
$$D_n = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 2 \end{vmatrix} = ?$$

**Úloha 6.5.10\*.** 
$$D_n = \begin{vmatrix} a+b & ab & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & a+b & ab & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & a+b & ab & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & a+b & ab \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & a+b \end{vmatrix} = ?$$

**Úloha 6.5.11\*.** 
$$D_n = \begin{vmatrix} n & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & n & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 & 1 & n \end{vmatrix} = ?$$

**Úloha 6.5.12\*.** Vypočítajte determinant matice typu  $n \times n$

$$D_n = \begin{vmatrix} x & a & a & \dots & a \\ a & x & a & \dots & a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a & \dots & a & x & a \\ a & \dots & a & a & x \end{vmatrix} = ?$$

(Teda ide o maticu, kde diagonálne prvky sú rovné  $x$  a všetky prvky mimo diagonály sú rovné  $a$ .)

**Úloha 6.5.13\*.** 
$$D_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & \dots & 1 \\ 1 & 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & 3 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & n \end{vmatrix} = ?$$

**Úloha 6.5.14\***. Nájdite determinant matice  $A_n$  typu  $n \times n$ , ktorej prvky sú určené predpisom  $a_{ij} = \min\{i, j\}$ , t.j. napríklad

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} \quad A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

**Úloha 6.5.15.** Nech  $A$  je matica typu  $7 \times 7$ , ktorej prvky sú nepárne celé čísla. Ukážte, že  $|A|$  je celé číslo a ďalej, že  $|A|$  je celočíselný násobok čísla 64.

**Úloha 6.5.16.** Ak  $A, B$  sú štvorcové matice a matica  $AB$  je regulárna, tak obe matice  $A, B$  sú regulárne. (Môžete sa zamyslieť nad tým, či to viete zdôvodniť s pomocou determinantov a aj nad riešením bez nich. Takisto sa môžete skúsiť zamyslieť nad tým, čo sa stane ak matice nie sú štvorcové.)

**Úloha 6.5.17\***. Ukážte, že pre determinant blokovej matice platí

$$\det \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & D \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & D \end{pmatrix} = \det(A) \cdot \det(D)$$

(Hint: Možno sa oplatí začať tým, že si rozmyslíte, ako to je s determinantmi nejakých jednoduchších matíc – napríklad  $\det \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & I \end{pmatrix}$  alebo  $\det \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix}$ .)<sup>1</sup>

**Úloha 6.5.18.** Ak viete, že 195, 403 a 247 sú násobky čísla 13, viete ukázať (bez toho, aby ste ho museli vyrátať), že aj  $\begin{vmatrix} 1 & 9 & 5 \\ 4 & 0 & 3 \\ 2 & 4 & 7 \end{vmatrix}$  je celočíselný násobok 13?

---

<sup>1</sup>Azda sa oplatí poznamenať, že vo všeobecnosti sa determinant  $\begin{vmatrix} A & C \\ D & B \end{vmatrix}$  nemusí rovnať  $|A||B| - |C||D|$  ani  $|AB - CD|$ . Nejaké podmienky, kedy takéto niečo funguje, sa dajú nájsť v článku [Si].

## Dodatok A

# Delenie so zvyškom

O veciach, ktoré spomenieme v tomto dodatku, sa dá viac dozvedieť na predmetoch Teória čísel [Sle2] alebo Elementárna teória čísel [Č]. Tu zhrnieme základné veci, ktoré budeme potrebovať a podrobnejšie si na príkladoch ukážeme viacero postupov, ktoré sa v tejto prednáške objavia častejšie.

TODO

## Dodatok B

# Komplexné čísla

Základné vlastnosti komplexných čísel môžete nájsť vo veľkom množstve vysokoškolských i stredoškolských učebníc, ako napríklad [I, Kapitola 13], [KMŠ, Kapitola II.10], [Sm], [Bl] a mnoho iných. Kniha [AA] sa venuje komplexným číslam od základných poznatkov až po ich použitie v úlohách olympiádného charakteru.

Niektorí z vás preberali komplexné čísla na strednej škole, pre tých, ktorí ich nemali, sa tu pokúsime zhrnúť ich najdôležitejšie vlastnosti, ktoré budete potrebovať.

### B.1 Definícia komplexných čísel, algebraický tvar komplexného čísla

Vieme, že v reálnych číslach nemá rovnica

$$x^2 = -1$$

riešenie. (Pre každé reálne číslo platí  $x^2 \geq 0$ .) Čo by sme potrebovali urobiť, keby sme chceli dostať číselný obor, v ktorom táto rovnica bude mať riešenie? Znamená to vlastne, že chceme k reálnym číslam pridať nejaké „nové“ čísla a zdefinovať na nich sčítanie a násobenie tak, aby sa tieto operácie správali podobne ako pre reálne čísla. (Pod slovom „podobne“ rozumieme to, že novovytvorený číselný obor má byť pole.) Ideme sa teraz pokúsiť zdefinovať takéto pole, ktoré potom nazveme polom komplexných čísel.

Určite musíme teda pridať aspoň jedno riešenie rovnice  $x^2 = -1$ . Označíme ho  $i$  a budeme ho nazývať *imaginárna jednotka*. Teda

$$i^2 = -1. \tag{B.1}$$

Pretože chceme, aby komplexné čísla obsahovali všetky reálne čísla musíme potom pridať aj čísla tvaru  $b.i$ , pre ľubovoľné  $b \in \mathbb{R}$  a aj čísla tvaru  $a + bi$  pre ľubovoľné  $a \in \mathbb{R}$ . Ukážeme si, že tieto čísla už postačia na to, aby sme vytvorili pole.

**Definícia B.1.1.** *Komplexným číslom* budeme nazývať ľubovoľné číslo tvaru

$$a + bi,$$

kde  $a, b \in \mathbb{R}$ . Množinu všetkých komplexných čísel označujeme

$$\mathbb{C} = \{a + bi; a, b \in \mathbb{R}\}.$$

Zápis komplexného čísla v tvare  $a + bi$  nazývame *algebraický zápis* komplexného čísla. Pri tom  $a$  sa nazýva *reálna časť* komplexného čísla a  $bi$  sa nazýva *imaginárna časť* komplexného čísla. Pre komplexné číslo  $z = a + bi$  označujeme jeho reálnu časť  $\operatorname{Re} z = a$  a imaginárnu časť  $\operatorname{Im} z = bi$ . (Niekedy sa tiež používa označenie  $\Re z$  a  $\Im z$ .) Číslo, ktoré má nulovú reálnu časť, sa nazýva *rýdzoimaginárne*.

Komplexné číslo je jednoznačne určené svojou reálnou a imaginárnou časťou, teda dve komplexné čísla  $z_1 = a_1 + b_1i$  a  $z_2 = a_2 + b_2i$  sa rovnajú práve vtedy, keď

$$a_1 = a_2 \quad \text{a} \quad b_1 = b_2.$$

**Poznámka B.1.2.** Definíciu komplexných čísel môžeme chápať takým spôsobom, že sme zaviedli nejaký nový symbol  $i$  a komplexné čísla sú formálne zápisy tvaru  $a + bi$ , pričom  $a, b$  sú ľubovoľné reálne čísla.

Iná možnosť by bola definovať komplexné čísla ako usporiadané dvojice reálnych čísel a dohodnúť sa, že namiesto  $(a, b)$  budeme používať zápis  $a + bi$ . (Všimnite si, že takýto prístup zodpovedá tomu, že 2 komplexné čísla považujeme za rovnaké práve vtedy, keď majú rovnaké obe zložky.)

Pri prvom prístupe (formálne zápisy tvaru  $a + bi$ ) je jasné, že reálne čísla sú podmnožinou komplexných čísel. (Každé reálne číslo  $a$  sa dá vyjadriť ako  $a + 0i$ , teda je prvkom množiny  $\mathbb{C}$ .) Pri druhom prístupe reálne čísla stotožníme s množinou  $\{(a, 0); a \in \mathbb{R}\}$ . Sčítovanie a násobenie definujeme tak, aby korešpondovali so sčítaním a násobením reálnych čísel.

Pomocou nového symbolu  $i$  sme zaviedli nejakú množinu, ktorej prvky sme nazvali komplexné čísla. Ďalej by sme na tejto množine chceli zaviesť operácie sčítovania a násobenia tak, aby množina  $\mathbb{C}$  s týmito operáciami tvorila pole.

Súčet 2 komplexných čísel definujeme veľmi prirodzeným spôsobom – sčítame ich reálne časti aj imaginárne časti:

$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i \quad (\text{B.2})$$

Ak chceme, aby platila distributívnosť, tak pre súčin čísel  $a + bi$  a  $c + di$  musí platiť

$$(a + bi)(c + di) = ac + bci + adi + bdi^2$$

a z rovnosti (B.1) potom máme

$$(a + bi)(c + di) = (ac - bd) + (bc + ad)i \quad (\text{B.3})$$

**Príklad B.1.3.**  $(2 + 3i) + (2 - i) = 4 + 2i$

$$(2 + 3i)(2 - i) = 4 - 2i + 6i + 3 = 7 + 4i$$

$$(\sqrt{2} + \sqrt{2}i)(\sqrt{2} + \sqrt{2}i) = 2 + 2i + 2i - 2 = 4i$$

Oplatí sa zapamätať si, že

$$\begin{aligned} i^1 &= i & i^2 &= -1 & i^3 &= -i & i^4 &= 1 \\ i^{4k+1} &= i & i^{4k+2} &= -1 & i^{4k+3} &= -i & i^{4k} &= 1 \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

**Poznámka B.1.4.** Násobenie a sčítovanie by sme definovali analogicky, keby sme komplexné čísla chápali ako dvojice reálnych čísel, pozri úloha 3.3.11.



Dôležité je, že takto definované operácie  $+$  a  $\cdot$  sa správajú „rozumne“. Inak povedané, radi by sme ukázali, že  $(\mathbb{C}, +, \cdot)$  je pole.

Niektoré z vlastností poľa sú zrejmé takmer okamžite. Komutatívnosť a asociatívnosť operácie  $+$  sa overí ľahko. Neutrálny prvok tejto operácie je  $0 = 0 + 0i$  a inverzný prvok k  $a + bi$  je  $-(a + bi) = (-a) + (-b)i$ . Z toho špeciálne vyplýva, že komplexné čísla vieme aj odčítovať,

$$(a + bi) - (c + di) = (a - c) + (b - d)i.$$

(Môžete si všimnúť, že ak sa na komplexné čísla pozeráme ako na dvojice reálnych čísel, tak je to tá istá operácia, ktorú sme zaviedli v úlohe 3.2.1g), resp. v príklade 4.1.3, kde sme videli, že dvojice reálnych čísel môžeme chápať ako vektorový priestor.)

V prípade operácie  $\cdot$  máme o trochu komplikovanejšiu situáciu. Jej komutatívnosť je jasná priamo z definície. Skúsme overiť asociatívnosť. Teda máme 3 komplexné čísla  $z_1 = a + bi$ ,  $z_2 = c + di$  a  $z_3 = e + fi$  a chceme priamym výpočtom (teda na základe definície násobenie) overiť  $z_1(z_2z_3) = (z_1z_2)z_3$ .

$$\begin{aligned} z_1(z_2z_3) &= (a + bi)[(c + di)(e + fi)] = (a + bi)[(ce - df) + (cf + de)i] = \\ &= (ace - adf - bcf - bde) + (acf + ade + bce - bdf)i \\ (z_1z_2)z_3 &= [(a + bi)(c + di)](e + fi) = [(ac - bd) + (bc + ad)i](e + fi) = \\ &= (ace - bde - bcf - adf) + (acf - bdf + bce + ade)i \end{aligned}$$

Vidíme, že v oboch prípadoch sme dostali taký istý výsledok.

Ľahko sa overí, že neutrálny prvok pre násobenie je  $1 = 1 + 0i$ .

Potrebovali by sme ešte zistiť, či vieme komplexné čísla deliť (z toho dostaneme existenciu inverzného prvku). Deliť komplexným číslom  $c + di$  môžeme iba vtedy, ak je toto číslo rôzne od nuly. Teda  $c + di \neq 0 + 0i$ , čo znamená, že buď  $c \neq 0$  alebo  $d \neq 0$ . Spôsob, akým to urobíme, sa podobá na trik, ktorým obvykle odstraňujeme z menovateľa odmocninu.

$$\frac{a + bi}{c + di} = \frac{a + bi}{c + di} \cdot \frac{c - di}{c - di} = \frac{(a + bi)(c - di)}{(c + di)(c - di)} = \frac{(ac + bd) + (bc - ad)i}{c^2 + d^2} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}i \quad (\text{B.5})$$

Všimnime si, že ak je aspoň jedno z reálnych čísel  $c, d$  nenulové, tak  $c^2 + d^2 > 0$ , čiže v predchádzajúcom výraze nevystupuje v menovateli nula.

**Príklad B.1.5.**  $\frac{1+2i}{2-i} = \frac{(1+2i)(2+i)}{(2-i)(2+i)} = \frac{5i}{5} = i$

Jediná vlastnosť z definície poľa, ktorú sme zatiaľ neoverili, je distributívnosť, t.j.

$$z_1(z_2 + z_3) = z_1z_2 + z_1z_3.$$

Táto vlastnosť sa opäť dá overiť priamym výpočtom (úloha B.4.3).

Overením jednotlivých vlastností sme dokázali:

**Veta B.1.6.** *Komplexné čísla s operáciami  $+$  a  $\cdot$  definovanými vzťahmi (B.2) a (B.3) tvoria pole.*

Akonáhle máme dokázanú túto vetu, vieme, že pre komplexné čísla môžeme používať všetky vlastnosti z tvrdenia 3.3.4 a takisto vlastnosti, ktoré sme dokázali v cvičeniach v časti 3.3. (Takisto, keďže sme sa naučili riešiť systavy lineárnych rovníc, počítat determinanty, inverzné matice a mnohé ďalšie veci v ľubovoľnom poli, vieme to robiť aj v poli komplexných čísel.)

Číslo  $a - bi$ , ktorým sme rozšírili čitateľ aj menovateľ pri výpočte podielu dvoch komplexných čísel (pozri (B.5) a príklad B.1.5) sa vyskytuje v súvislosti s číslom  $a + bi$  pomerne často.

**Definícia B.1.7.** *Komplexne združeným číslom* k číslu  $z = a + bi$  nazývame číslo  $\bar{z} = a - bi$ .

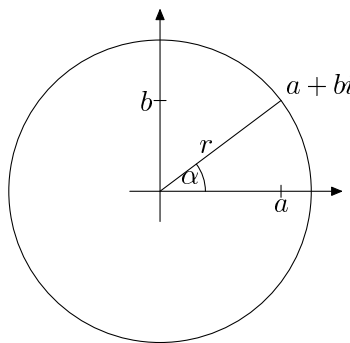
**Úloha B.1.1.** Overte, že platí (pre ľubovoľné  $z, z_1, z_2 \in \mathbb{C}$ )

$$\begin{aligned} \overline{z_1 + z_2} &= \bar{z}_1 + \bar{z}_2 \\ \overline{z_1 \cdot z_2} &= \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2 \\ z \cdot \bar{z} &= |z|^2 \\ z = \bar{z} &\Leftrightarrow z \text{ je reálne} \\ z = -\bar{z} &\Leftrightarrow z \text{ je rýdzoimaginárne} \end{aligned}$$

Symbol  $|z|$  označuje absolútnu hodnotu komplexného čísla  $z$ . Ak  $z = a + bi$ , tak absolútna hodnota je definovaná ako  $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ . (Budeme sa jej venovať o chvíľu.)

## B.2 Geometrická interpretácia komplexných čísel, goniometrický tvar, Moivrova veta

Ako sme už spomenuli, komplexné čísla môžeme stotožniť s dvojicami reálnych čísel. Takisto vieme, že dvojiciam reálnych čísel vieme jednoznačne priradiť aj body v rovine. Čiže komplexné čísla môžeme chápať aj ako body v rovine. V tejto podkapitole uvidíme, že takáto interpretácia komplexných čísel poskytuje zaujímavú interpretáciu pre sčítovanie a násobenie komplexných čísel.



Obr. B.1: Znázornenie komplexného čísla v rovine

Keď stotožníme komplexné číslo s bodom v rovine, môžeme sa pozrieť na jeho vzdialenosť od počiatku súradnicovej sústavy a na uhol, ktorý zvierá s osou  $x$ . Majme komplexné číslo  $z = a + bi$ , ktorému zodpovedá bod  $(a, b)$ . Z Pytagorovej vety vieme vzdialenosť od počiatku určiť ako

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

a uhol medzi spojnicou bodov  $(0, 0)$ ,  $(a, b)$  a osou  $x$  sa dá zistiť z rovností  $\cos \varphi = \frac{a}{r}$  a  $\sin \varphi = \frac{b}{r}$ . Pre tieto hodnoty  $r$  a  $\varphi$  platí

$$a + bi = r(\cos \varphi + i \sin \varphi).$$

**Definícia B.2.1.** Zápis komplexného čísla v tvare

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

nazývame *goniometrický zápis* komplexného čísla. Číslo  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$  nazývame *absolútna hodnota* alebo tiež *modul* komplexného čísla  $z$  a označujeme ho  $|z|$ . Číslo  $\varphi$  také, že  $a = r \cos \varphi$  a  $b = r \sin \varphi$  nazývame *argument* komplexného čísla  $z$ .

**Príklad B.2.2.** Pokúsme sa previesť do goniometrického tvaru číslo  $z = 1 - \sqrt{3}i$ . Dostávame  $r = |z| = \sqrt{1+3} = 2$ . Z toho dostávame, že pre argument čísla  $z$  musí platiť

$$\begin{aligned}\cos \varphi &= \frac{1}{2} \\ \sin \varphi &= -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{aligned}$$

Riešeniami prvej rovnice sú práve uhly

$$\varphi = \pm \frac{\pi}{3} + 2k\pi$$

pre  $k \in \mathbb{Z}$ . Keď vezmeme do úvahy, že sínus má byť záporný, dostaneme

$$\varphi = -\frac{\pi}{3} + 2k\pi.$$

(Tým je uhol  $\varphi$  určený až na násobok  $2\pi$ . Otočenie o uhol  $2\pi$  okolo počiatku samozrejme bod v rovine nemení.)

Obrátene, ak máme daný goniometrický tvar komplexného čísla, ľahko ho prevedieme na algebraický tvar. Napríklad

$$\sqrt{2} \left( \cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4} \right) = \sqrt{2} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}i \right) = 1 + i.$$

Nasledujúca veta hovorí, že ak máme komplexné čísla zapísané v goniometrickom tvare, tak pri ich vynásobení sa vynásobia ich absolútne hodnoty a ich argumenty sa sčítajú.

**Veta B.2.3** (Moivrova veta). *Nech  $z_1 = r_1(\cos \alpha + i \sin \alpha)$  a  $z_2 = r_2(\cos \beta + i \sin \beta)$ . Potom pre ich súčin platí*

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta)). \quad (\text{B.6})$$

*Špeciálne z toho vyplýva, že pre absolútne hodnoty platí*

$$|z_1 z_2| = |z_1| \cdot |z_2|. \quad (\text{B.7})$$

*Dôkaz.* Overme najprv rovnosť (B.7). Označme  $z_1 = a + bi$  a  $z_2 = c + di$ , teda  $z_1 z_2 = (ac - bd) + (ad + bc)i$ . Upravujme najprv  $|z_1 z_2|$ . Lepšie sa nám bude pracovať bez druhej odmocniny, preto tento výraz umocnime na druhú.

$$|z_1 z_2|^2 = (ac - bd)^2 + (ad + bc)^2 = (a^2 c^2 - 2abcd + b^2 d^2) + (a^2 d^2 + 2abcd + b^2 c^2) = (ac)^2 + (bd)^2 + (ad)^2 + (bc)^2$$

Teraz sa pokúsime upraviť  $|z_1|^2 \cdot |z_2|^2$

$$|z_1|^2 \cdot |z_2|^2 = (a^2 + b^2)(c^2 + d^2) = (ac)^2 + (ad)^2 + (bc)^2 + (bd)^2$$

Vidíme, že v oboch prípadoch sme dostali rovnaký výsledok. Teda  $|z_1 z_2|^2 = (|z_1| \cdot |z_2|)^2$ . Pretože ide o nezáporné čísla, môžeme túto rovnosť odmocniť a máme

$$|z_1 z_2| = |z_1| \cdot |z_2|.$$

Súčin čísel  $z_1 = r_1(\cos \alpha + i \sin \alpha)$  a  $z_2 = r_2(\cos \beta + i \sin \beta)$  môžeme upraviť ako

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos \alpha + i \sin \alpha)(\cos \beta + i \sin \beta) = r_1 r_2 [(\cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta) + i(\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta)].$$

Na základe goniometrických identít (známych zo strednej školy) vidíme, že

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 (\cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta)).$$

Už vieme, že  $|z_1 z_2| = r_1 r_2$ . Teda číslo  $z_1 z_2$  skutočne možno vyjadriť pomocou argumentu  $\alpha + \beta$ .  $\square$

**Dôsledok B.2.4.** Ak  $n \in \mathbb{N}$  a  $z = r(\cos \alpha + i \sin \alpha)$ , tak

$$z^n = r^n (\cos(n\alpha) + i \sin(n\alpha))$$

Tento vzťah medzi násobením komplexných čísel a sčítovaním uhlom umožňuje elegantné odvodenie mnohých trigonometrických identít.

**Príklad B.2.5.** Umocnením čísla  $\cos \alpha + i \sin \alpha$  na  $n$ -tú pre  $n \in \mathbb{N}$  dostaneme

$$(\cos \alpha + i \sin \alpha)^n = \cos(n\alpha) + i \sin(n\alpha) = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} i^{n-j} \cos^j \alpha \sin^{n-j} \alpha$$

Keď teraz použijeme (B.4) a rozdelíme súčet na pravej strane na reálnu a imaginárnu časť, vidíme, že

$$\begin{aligned} \cos nx &= \cos^n x - \binom{n}{2} \cos^{n-2} x \sin^2 x + \binom{n}{4} \cos^{n-4} x \sin^4 x - \dots \\ \sin nx &= n \cos^{n-1} x \sin x - \binom{n}{3} \cos^{n-3} x \sin^3 x + \binom{n}{5} \cos^{n-5} x \sin^5 x - \dots \end{aligned}$$

### B.3 Riešenie rovníc v komplexných číslach

Dôležitá vlastnosť komplexných čísel je vyjadrená v nasledujúcej vete:

**Veta B.3.1** (Základná veta algebry). Každý nenulový polynóm s komplexnými koeficientami má koreň v  $\mathbb{C}$ . T.j. ak

$$f(x) = c_n x^n + \dots + c_1 x + c_0,$$

tak existuje  $z \in \mathbb{C}$  také, že  $f(z) = 0$ .

Dokonca platí, že ak polynóm  $f(x)$  je stupňa  $n > 1$ , tak počet koreňov vrátane násobnosti je práve  $n$ . (Ak  $f(x) = (x - z)^k g(x)$  pre nejaký polynóm  $g(x)$  a  $z$  nie je koreňom polynómu  $g$ , hovoríme, že násobnosť koreňa  $z$  je  $k$ . K polynómom a násobnosti koreňov sa ešte dostanete neskôr v rámci predmetu algebra.)

Nie všetky rovnice takéhoto tvaru však vieme jednoducho riešiť. Ukážeme si len dva typy rovníc, ktoré sa dajú riešiť vcelku ľahko. Najprv uvidíme, že pri kvadratických rovniciach s reálnymi koeficientmi môžeme postupovať podobne ako v reálnych číslach.

### B.3.1 Kvadratické rovnice s reálnymi koeficientmi

Najprv si všimnime, že v komplexných číslach (na rozdiel od reálnych) vieme riešiť aj rovnicu  $x^2 = r$ , kde  $r$  je záporné reálne číslo.

Všimnime si, že každé záporné reálne číslo vieme zapísať v tvare  $-a^2$  pre nejaké  $a \in \mathbb{R}$ . Teda vlastne riešime rovnicu

$$\begin{aligned}x^2 &= -a^2, \\x^2 + a^2 &= 0, \\(x - ia)(x + ia) &= 0,\end{aligned}$$

ktorej riešeniami sú práve  $x = \pm ia$ .

Predpokladajme teraz, že máme rovnicu tvaru

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

kde  $a, b, c \in \mathbb{R}$  a  $a \neq 0$ .

Zopakujeme presne ten istý postup, ktorým sa zvykne na strednej škole odvodzovať vzorec pre výpočet koreňov kvadratickej rovnice – použijeme doplnenie na štvorec.

$$\begin{aligned}ax^2 + bx + c &= 0 \\a \left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 + c - \frac{b^2}{4a} &= 0 \\a \left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 &= \frac{b^2 - 4ac}{4a} \\ \left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 &= \frac{b^2 - 4ac}{4a^2}\end{aligned}$$

Označíme  $D = b^2 - 4ac$ . Ak  $D > 0$ , tak dostaneme

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}.$$

Ak  $D = 0$ , tak máme dvojnásobný koreň  $x = -\frac{b}{2a}$ . V prípade  $D < 0$  máme rovnicu tvaru  $z^2 = -(\sqrt{-D})^2$ , pre  $z = x + \frac{b}{2a}$ , o ktorej už vieme, že jej riešeniami sú  $z_{1,2} = \pm i\sqrt{-D}$ . Z toho dostaneme

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm i\sqrt{-D}}{2a}.$$

(Pretože  $D < 0$ , je  $-D$  je kladné reálne číslo a výraz  $\sqrt{-D}$  má zmysel.)

**Príklad B.3.2.** Riešme rovnicu  $x^2 + 4x + 5 = 0$ .

Dostaneme  $D = 16 - 20 = -4$  a

$$x_{1,2} = \frac{-4 \pm 2i}{2} = -2 \pm i.$$

Mohli by sme rovnaký postup ako v odvodení vzorca pre korene kvadratickej rovnice použiť, keby boli koeficienty komplexné? V podstate áno – ale na mieste, kde sme použili odmocninu (inak povedané, riešili sme rovnicu  $z^2 = \frac{D}{4a^2}$ ), zatiaľ nevieme, čo robiť v prípade, že  $D$  je komplexné číslo. Práve o niečom, čo sa dá nazvať „odmocninou“ z komplexného čísla, sa dozvieme o chvíľu.

### B.3.2 Binomické rovnice

Rovnicu tvaru  $x^2 = a$  vieme vyriešiť pre  $a \in \mathbb{R}$  (či už kladné alebo záporné). Skúsme sa zamyslieť nad tým, čo by sa stalo, keby sme na pravej strane mali nejaké komplexné číslo.

Riešime teda rovnicu

$$x^n = z,$$

v obore komplexných čísel. Skúsme čísla vystupujúce v rovnici upraviť na goniometrický tvar. Nech teda  $x = r(\cos \alpha + i \sin \alpha)$  a  $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ . Potom dostaneme

$$r^n (\cos(n\alpha) + i \sin(n\alpha)) = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi).$$

Predchádzajúca rovnosť je splnená práve vtedy, keď  $r^n = |z|$ , čiže

$$r = \sqrt[n]{|z|}$$

a  $n\alpha = \varphi + 2k\pi$  čiže

$$\alpha = \frac{\varphi}{n} + \frac{2k}{n}\pi,$$

pre  $k = 0, \dots, n-1$ . (Ten istý bod znamená rovnakú vzdialenosť od počiatku, uhol sa môže líšiť o  $2\pi$ , lebo otočenie o násobok  $2\pi$  je identické zobrazenie. Stačí použiť  $k$  od 0 po  $n-1$ , lebo potom sa už body začnú opakovať – uhly sa budú líšiť o násobok  $\frac{2n}{n}\pi = 2\pi$ .)

**Príklad B.3.3.** Riešme rovnicu  $x^4 = 1+i$ . Najprv prevedieme pravú stranu na goniometrický tvar:  $x^4 = \sqrt{2}(\cos \frac{\pi}{4} + i \sin \frac{\pi}{4})$ . Pre  $x = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$  dostaneme

$$x^4 = r^4(\cos 4\varphi + i \sin 4\varphi),$$

čiže

$$r^4 = \sqrt{2} \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt[4]{2}.$$

Pre uhol  $\varphi$  dostávame

$$4\varphi = \frac{\pi}{4} + 2k\pi \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{\pi}{16} + k\frac{\pi}{2}.$$

Všetky riešenia danej rovnice sú teda  $\sqrt[4]{2}(\cos(\frac{\pi}{16} + k\frac{\pi}{2}) + i \sin(\frac{\pi}{16} + k\frac{\pi}{2}))$  pre  $k = 0, 1, 2, 3$ .

Niekedy sa zvyknú všetky riešenia rovnice  $x^n = z$  nazývať *n-tými odmocninami* komplexného čísla  $z$ . Môžeme si všimnúť, že vzorec

$$x = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}$$

bude platiť aj teraz ak symbol  $\sqrt{D}$  chápeme v takom zmysle, že zaň možno dosadiť ktorúkoľvek z druhých odmocnín čísla  $D$ . (Teda ktorékoľvek komplexné číslo také, že  $x^2 = D$ .)

**Príklad B.3.4.** Vyriešme rovnicu  $x^2 - (1+i)x - 2-i = 0$ .

Dostaneme  $D = (1+i)^2 + 4(2+i) = 2i + 8 + 4i = 8 + 6i$ . Diskriminant prevedieme na goniometrický tvar. Dostaneme

$$8 + 6i = 10(\cos \varphi + i \sin \varphi), \text{ kde } \cos \varphi = \frac{4}{5}, \sin \varphi = \frac{3}{5}.$$

Komplexné odmocniny z tohto čísla sú

$$u_{1,2} = \sqrt{10} \left( \cos \left( \frac{\varphi}{2} + k\pi \right) + i \sin \left( \frac{\varphi}{2} + k\pi \right) \right),$$

pre  $k = 1, 2$ . Pritom  $|\cos \frac{\varphi}{2}| = \sqrt{\frac{1+\cos \varphi}{2}} = \sqrt{\frac{9}{10}} = \frac{3}{\sqrt{10}}$  a  $|\sin \frac{\varphi}{2}| = \sqrt{\frac{1-\cos \varphi}{2}} = \sqrt{\frac{1}{10}} = \frac{1}{\sqrt{10}}$ .

Z jednotkovej kružnice (na základe kvadrantu, v ktorom je  $\varphi$ ) vieme určiť aj znamienko kosínu a sínu, čiže dostaneme

$$u_{1,2} = \pm(3 + i).$$

Z toho dostaneme riešenia kvadratickej rovnice ako

$$x_{1,2} = \frac{1 + i \pm (3 + i)}{2}$$

$$x_1 = 2 + i \quad x_2 = -1$$

O správnosti riešenia sa môžeme presvedčiť dosadením alebo roznásobením  $(x - 2 - i)(x + 1) = x^2 - (1 + i)x - 2 - i$ .

Spôsoby riešenia niektorých ďalších typov rovníc (kubické, bikvadratické, reciproké) nájdete napríklad v [KGGs, Kapitola 6].

## B.4 Zopár ďalších vecí súvisiacich s komplexnými číslami

Spomenieme veľmi stručne niekoľko ďalších faktov o komplexných číslach.

**Exponenciálny tvar komplexného čísla.** Často sa stretnete so zápisom komplexného čísla v tvare

$$r(\cos \varphi + i \sin \varphi) = re^{i\varphi}$$

alebo

$$\cos \varphi + i \sin \varphi = e^{i\varphi}.$$

Bez toho, aby sme sa tým zaoberali hlbšie, tento zápis môžeme považovať jednoducho za skratku zápisu goniometrického zápisu. (Z Moivreovej vety vieme, že násobenie komplexných čísel s veľkosťou 1 funguje ako sčítovanie exponentov = sčítovanie uhlov.)

**Kvaternióny.** Podobným spôsobom ako komplexné čísla sa dajú vybudovať *kvaternióny*. V tomto prípade sa pridajú 3 nové prvky  $i, j, k$ , ktorých druhá mocnina je  $-1$  a vhodne sa pre ne zafinuje súčin. Kvaternióny tiež majú geometrický význam, ich násobenie súvisí s vektorovým súčinom. Na rozdiel od komplexných čísel však netvorí pole (násobenie nie je komutatívne.) Viac sa o nich môžete dočítať napríklad v [KGGs, Podkapitola 4.7].

**Komplexné čísla sa nedajú usporiadať.** Na reálnych číslach existuje relácia  $\leq$ , ktorá (okrem iných vlastností) spĺňa

(i) Ľubovoľné dve reálne čísla sú porovnateľné, teda platí aspoň 1 z možností  $x \leq y$  a  $y \leq x$ .

(ii)  $x \leq y \wedge y \leq x \Rightarrow x = y$ .

(iii)  $x \leq y \Rightarrow x + z \leq y + z$ .

(iv)  $0 \leq z \wedge x \leq y \Rightarrow xz \leq yz$ .

Na komplexných číslach sa nedá zdefinovať relácia  $\leq$ , ktorá by mala podobné vlastnosti. Z uvedených vlastností totiž pre každé  $x$  vieme odvodiť  $x^2 \geq 0$ . (Ak  $x \geq 0$ , tak túto rovnosť vynásobíme číslom  $x$ , ak  $x \leq 0$ , tak vynásobením číslom  $-x$  dostaneme  $-x^2 \leq 0$ , z čoho vyplýva  $0 \leq x^2$ .)

Dostaneme teda, že  $i^2 = -1 \geq 0$  a po pripočítaní 1 máme  $0 \geq 1$ . Súčasne však  $(-1)^2 = 1 \geq 0$ , teda  $0 = 1$ , čo je spor.

Vlastnosti, ktoré sme uviedli, sú niektoré z vlastností usporiadaných polí. O usporiadaných poliach sa viac môžete dočítať napríklad v [ŠHHK]. S pojmom relácia usporiadania ste sa pravdepodobne už stretli.

### Cvičenia

**Úloha B.4.1.** Vypočítajte

- a)  $(3 + 2i) + (2 - i)$    b)  $(1 + i) + (1 - i)$    c)  $(1 + 3i) + (\sqrt{3} + i)$   
 d)  $(3 + 2i)(2 - i)$    e)  $(1 + i)(1 - i)$    f)  $(1 + \sqrt{3}i)(\sqrt{3} + i)$   
 g)  $(3 + 2i) - (2 - i)$    h)  $(1 + i) - (1 - i)$    i)  $(1 + 3i) - (\sqrt{3} + i)$   
 j)  $(3 + 2i)/(2 - i)$    k)  $(1 + i)/(1 - i)$    l)  $(1 + \sqrt{3}i)/(\sqrt{3} + i)$

**Úloha B.4.2.** Overte výpočtom, že pri oboch uzátvorkovaniach výrazu  $(1 + 2i)(1 - i)(2 - i)$  dostaneme ten istý výsledok.

**Úloha B.4.3.** Overte, že pre sčítanie a násobenie komplexných čísel platí distributívnosť.

**Úloha B.4.4.** Overte, že pre komplexné čísla platí trojuholníková nerovnosť  $|z_1 + z_2| \leq |z_1| + |z_2|$ . Čo predstavuje táto nerovnosť geometricky?

**Úloha B.4.5.** Vieme, že na reálnej osi predstavujú riešenia nerovnice  $|x - a| < r$  interval  $(a - r, a + r)$  (pre  $a, r \in \mathbb{R}$  a  $r > 0$ ). Aký geometrický útvar v komplexnej rovine tvoria komplexné čísla vyhovujúce podmienke:

- a)  $|z - z_0| < r$ ,  
 b)  $|z - z_0| = r$ ,  
 c)  $|z - z_0| \leq r$ ,

kde  $z_0$  je dané komplexné číslo a  $r$  je dané kladné reálne číslo?

**Úloha B.4.6\*.** Ak  $z_1, z_2 \in \mathbb{C}$  a  $r \in \mathbb{R}$ ,  $r > 0$ , aký geometrický útvar tvoria body zodpovedajúce komplexným číslam s vlastnosťou  $|z - z_1| + |z - z_2| = r$ ? Načrtnite ho pre  $z_1 = 0$  a  $z_2 = 3 + 2i$ .

**Úloha B.4.7.** Nájdite goniometrický tvar daných komplexných čísel:

- a)  $1 - i$ ; b)  $\sqrt{3} + i$ ; c)  $-i$ ; d)  $2 + i$ ; e)  $(1 + i)(1 - i)$

**Úloha B.4.8.** Vyriešte rovnice:

- a)  $x^2 - 4x + 13 = 0$  b)  $4x^2 + 4x + 2 = 0$  c)  $x^2 - 6x + 13 = 0$  d)  $x^2 + 2x + 50 = 0$  e)  $x^2 + x + 1 = 0$

**Úloha B.4.9.** Vyriešte rovnice:

- a)  $z^2 = \frac{1-3i}{1+3i} - \frac{1}{5} + \frac{3}{5}i$ ; b)  $z^6 = i$ ; c)  $\frac{z^4}{8} + i\sqrt{3} = -1$ ; d)  $z^4 = 1 + i$

**Úloha B.4.10.** Nájdite riešenia rovníc:

- a)  $x^2 + 2x + 3 = 0$ ; b)  $x^4 + 5x^2 + 4 = 0$   
 a)  $-1 \pm \sqrt{2}i$ ; b)  $\pm i, \pm 2i$ ,

**Úloha B.4.11.** Vyriešte rovnice:

- a)  $x^2 - (1 + 2i)x - 3 + i = 0$  b)  $x^2 - 2x + 1 - 2i = 0$  c)  $x^2 - (4 + 3i)x + 1 + 5i = 0$  d)  $x^2 - 3(1 + i)x + 5i = 0$  e)  $x^2 + (1 + i)x - 4i = 0$



**Úloha B.4.12.** Riešte rovnice:

a)  $z^3 - iz^2 + 4z - 4i = 0$  b)  $x^4 + x^2 + 1 = 0$  c)  $x^3 - (3 + 2i)x^2 + 2(1 + 3i)x - 4i = 0$  d)  
 $x^3 - 2ix^2 - x + 2i = 0$

**Úloha B.4.13.** Riešte sústavy (môžete napr. použiť Gaussovu eliminačnú metódu, vyrátať inverznú maticu, použiť Cramerovo pravidlo):

$$\begin{pmatrix} 1+i & 1-i & | & 1 \\ 1 & -1 & | & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1+i & -i & | & 0 \\ i & -1 & | & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i & 1 & | & 0 \\ 1 & 1-i & | & 2i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1+i & 2-i & | & 1+i \\ -1+2i & 3-2i & | & 1-i \end{pmatrix}$$

**Úloha B.4.14.** Nájdite všetky  $x \in \mathbb{R}$ , pre ktoré platí  $\left(\frac{1+xi}{1-xi}\right)^6 = \frac{3+4i}{3-4i}$

# Literatúra

- [A] Sheldon Axler. *Linear Algebra Done Right*. Springer-Verlag, New York, 2nd edition, 1997. Undergraduate Texts in Mathematics.
- [AA] Titu Andreescu and Dorin Andrica. *Complex Numbers from A to ...Z*. Birkhäuser, Boston, 2006.
- [Bl] Rudolf Blaško. Matematická analýza. <http://frcatel.fri.utc.sk/~beerb>.
- [Bó] Miklós Bóna. *Combinatorics of Permutations*. CRC, Boca Raton, 2004.
- [BM] Garrett Birkhoff and Saunders MacLane. *Prehľad modernej algebry*. Alfa, Bratislava, 1979.
- [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/>.
- [H] Jim Hefferon. Linear algebra. <http://joshua.smcvt.edu/linearalgebra/>.
- [HS] T. Hecht and Z. Sklenáriková. *Metódy riešenia matematických úloh*. SPN, Bratislava, 1992.
- [HZK] Milan Hejný, Valent Zat'ko, and Pavel Kršňák. *Geometria 1*. SPN, Bratislava, 1985.
- [I] Ján Ivan. *Matematika 1*. Alfa, Bratislava, 1983.
- [K] Július Korbaš. *Lineárna algebra a geometria I*. UK, Bratislava, 2003.
- [KGGŠ] Tibor Katriňák, Martin Gavalec, Eva Gedeonová, and Jaroslav Smítal. *Algebra a teoretická aritmetika 1*. UK, Bratislava, 2002.
- [KMŠ] Igor Kluvánek, Ladislav Mišík, and Marko Švec. *Matematika I*. Alfa, Bratislava, 4th edition, 1971.
- [L] Loren C. Larson. *Metódy riešenia matematických problémov*. ALFA, Bratislava, 1990.
- [M] Desmond MacHale. My favourite polynomial. *The Mathematical Gazette*, 75:157–165, 1991.
- [NS] A. Naylor and G. Sell. *Teória lineárnych operátorov v technických a prírodných vedách (Linear Operator Theory in Engineering and Science)*. Alfa, Bratislava.
- [O] Petr Olšák. Lineární algebra. <http://math.feld.cvut.cz/olsak/linal.html>.

- [Si] John R. Sylvester. Determinants of block matrices. *The Mathematical Gazette*, 84(501):460–467, 2000.
- [Sle1] Martin Sleziak. Teória množín. Poznámky k prednáške, <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/sleziak/vyuka/>.
- [Sle2] Martin Sleziak. Teória čísel. Poznámky k prednáške, <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/sleziak/vyuka/>.
- [Slo] Jan Slovák. Lineární algebra. <http://www.math.muni.cz/~slovak/>.
- [Sm] Jozef Smida. *Komplexné čísla, matematika pre 4. ročník gymnázií*. SPN, Bratislava, 1987.
- [SGZ] Jaroslav Smítal, Eva Gedeonová, and Štefan Znam. *Úvod do lineárnej algebry*. UK, Bratislava, 1978. [http://cyril-244.fmph.uniba.sk/mffuk/studium/stud\\_materialy/stud\\_materialy/UVOD\\_LA/](http://cyril-244.fmph.uniba.sk/mffuk/studium/stud_materialy/stud_materialy/UVOD_LA/).
- [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.
- [W] Seth Warner. *Modern algebra*. Dover, New York, 1990.
- [Z1] Pavol Zlatoš. Lineárna algebra a geometria. <http://thales.doa.fmph.uniba.sk/zlatos/>.
- [Z2] 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
  - komplexne združené, 146
- štandardná báza  $F^n$ , 64
- aditívny zápis, 34
- adjungovaná matica, 135
- algebraický doplnok, 126
- asociatívnosť, 27
- asociatívnosť skladania zobrazení, 16
- báza, 63
  - štandardná, 64
- bijekcia, 16
- binárna operácia, 24
- Cramerovo pravidlo, 137
- dôkaz
  - nepriamy, 7
  - priamy, 7
  - sporom, 7
- de Morganove pravidlá, 10
- definícia matematickou indukciou, 9
- definičný obor, 14
- determinant, 124
- diagonálna matica, 76
- dimenzia, 65
- direktný súčet, 73
- disjunkcia, 10
- distributívnosť, 38
- ekvivalencia, 10
- elementárna riadková operácia, 77
- Gaussova eliminačná metóda, 108
- generovanie vektorového priestoru, 56
- grupa, 32
  - abelovská, 33
  - komutatívna, 33
- hodnosť matice, 81
- identické zobrazenie, 18
- identita, 18
- imaginárna jednotka, 143
- implikácia, 10
  - obmena, 11
- indukčný krok, 8
- indukčný predpoklad, 8
- indukcia
  - úplná, 9
  - matematická, 8
- injekcia, 16
- inklúzia, 12
- inverzia, 123
- inverzná matica, 98
- inverzný prvok, 28
- inverzný prvok v poli, 38
- izomorfizmus vektorových priestorov, 99
- jednotková matica, 76
- komplexné číslo, 143
  - algebraický zápis, 144
  - goniometrický zápis, 147
  - imaginárna časť, 144
  - rýdzoimaginárne, 144
  - reálna časť, 144
- komutatívnosť, 27
- konjunkcia, 10
- Kritérium vektorového podpriestoru, 54
- Kroneckerov symbol, 76
- Laplaceov rozvoj, 129
- lineárna kombinácia, 55
- lineárne nezávislé vektory, 58
- lineárne závislé vektory, 58
- lineárne zobrazenie, 86
- lineárny izomorfizmus, 99
- lineárny obal, 56
- lineárny súčet, 72
- matica, 75

- štvorcová, 76
- adjungovaná, 135
- bloková, 118
- elementárnej riadkovej operácie, 101
- regulárna, 99
- transponovaná, 76
- matica lineárneho zobrazenia, 89
- matica sústavy, 104
  - rozšírená, 104
- množina, 12
  - prázdna, 12
- množiny
  - karteziánsky súčin, 14
  - prienik, 13
  - rozdiel, 13
  - zjednotenie, 13
- multiplikatívny zápis, 34
- negácia, 10
- neutrálny prvok, 26
  - ľavý, 26
  - pravý, 26
- nulový vektor, 47
- obor hodnôt, 14
- obraz množiny, 20
- opačný prvok, 38
- opačný vektor, 47
- permutácia, 22
- podmnožina, 12
- podpriestor, 52
- podpriestor prislúchajúci matici, 77
- pole, 37
- priamy súčet, 73
- prvočíslo, 40
- racionálne číslo, 4
- redukovaná trojuholníková matica, 78
- riadková ekvivalencia matíc, 77
- rovnosť množín, 12
- rovnosť zobrazení, 15
- rozdiel vektorov, 47
- súčet matíc, 75
- súčin matíc, 92
- sústava
  - homogénna, 105
  - riešiteľná, 104
- sústava lineárnych rovníc, 104
- Sarrusovo pravidlo, 124
- skalár, 47
- skladanie zobrazení, 15
- stopa matice, 96
- surjekcia, 16
- triviálne riešenie homogénnej sústavy, 105
- usporiadaná dvojica, 14
- vedúci prvok, 78
- vektor, 47
- vektorový priestor, 47
  - konečnorozmerný, 63
- Vennove diagramy, 13
- veta
  - Frobeniova, 111
  - malá Fermatova, 44, 46
  - Steinitzova o výmene, 60
- vzor množiny, 20
- zákony o krátení, 33
- zložené číslo, 40
- zobrazenie, 14
  - bijektívne, 16
  - injektívne, 16
  - inverzné, 18
  - na, 16
  - prosté, 16
  - surjektívne, 16

## Zoznam symbolov

$\mathbb{N}$	4	$\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$	48
$\mathbb{Z}$	4	$f + g$	48
$\mathbb{Z}^+$	4	$c \cdot f$	48
$\mathbb{Q}$	4	$[\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2, \dots, \vec{\alpha}_n]$	56
$\mathbb{R}$	4	$F^n$	64
$\mathbb{C}$	4	$\vec{\varepsilon}_i$	64
$\mathbb{R}^+$	4	$d(V)$	65
$\mathbb{R}_0^+$	4	$S + T$	71
$\mathbb{R}^-$	4	$S \oplus T$	73
$\mathbb{R}_0^-$	4	$\ a_{ij}\ $	75
$\neg$	10	$c \cdot A$	75
$\wedge$	10	$I$	76
$\vee$	10	$I_n$	76
$\Rightarrow$	10	$\delta_{ij}$	76
$\Leftrightarrow$	10	$A^T$	76
$\in$	12	$V_A$	77
$\emptyset$	12	$A \sim B$	77
$\subseteq$	12	$h(A)$	81
$A \cup B$	13	$A_f$	89
$A \cap B$	13	$f_A$	89
$A \setminus B$	13	$A \cdot B$	92
$A \times B$	14	$AB$	92
$(a, b)$	14	$A^{-1}$	98
$f: X \rightarrow Y$	14	$S_n$	123
$f(x)$	14	$i(\varphi)$	123
$f = g$	15	$A_{ij}$	126
$g \circ f$	15	$M_{ij}$	127
$id_X$	18	$\text{adj } A$	135
$f^{-1}$	18	$i$	143
$f[A]$	20	$\mathbb{C}$	144
$f^{-1}(B)$	20	$\text{Re } z$	144
$a * b$	24	$\text{Im } z$	144
$\mathbb{Z}_5$	25	$\bar{z}$	146
$a^{-1}$	29	$ z $	147
$0$	37		
$1$	37		
$-a$	38		
$a^{-1}$	38		
$b - c$	38		
$\mathbb{Z}_n$	40		
$n \times a$	44		
$a^n$	44		
$\vec{0}$	47		
$-\vec{\alpha}$	47		
$\vec{\alpha} - \vec{\beta}$	47		
$\mathbb{R}^n$	48		