

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Lineární algebra – SLA  
Poznámky z přednášek

23. ledna 2022

David Sedlák (xsedla1d@stud.fit.vutbr.cz)

Pullrequesty a připomínky můžete směřovat do repozitáře: [www.github.com/Dajvid/SLA-notes](https://www.github.com/Dajvid/SLA-notes)

# Obsah

<b>1 První přednáška</b>	<b>3</b>
1.1 Logika . . . . .	3
1.2 Teorie množin . . . . .	4
<b>2 Druhá přednáška</b>	<b>9</b>
2.1 Algebraické struktury . . . . .	9
2.1.1 Grupa . . . . .	9
2.1.2 Pole . . . . .	10
2.1.3 Konečná pole . . . . .	11
2.2 Konstrukce množiny reálných čísel . . . . .	16
2.3 Mohutnosti nekonečných množin . . . . .	18
<b>3 Třetí přednáška</b>	<b>21</b>
3.1 Vektorový prostor . . . . .	21
3.2 Matice . . . . .	24
3.3 Speciální případy matic . . . . .	25
3.4 Základní operace na maticích . . . . .	26
<b>4 Čtvrtá přednáška</b>	<b>28</b>
4.1 Vektorové prostory . . . . .	28
4.1.1 Speciální zobrazení mezi vektorovými prostory . . . . .	30
4.2 Matice . . . . .	33
<b>5 Pátá přednáška</b>	<b>35</b>
5.1 Metody pro výpočet determinantu . . . . .	35
5.1.1 Laplaceova metoda . . . . .	35
5.2 Inverzní matice . . . . .	37
5.3 Hodnota matice . . . . .	40
5.3.1 Výpočet hodnoty matice . . . . .	40
5.4 Výpočet determinantu pomocí ekvivalentních úprav . . . . .	41
5.5 Soustavy lineárních rovnic . . . . .	43
5.5.1 Gaussova eliminační metoda . . . . .	44
<b>6 Šestá přednáška</b>	<b>46</b>

6.1	Matice . . . . .	46
6.2	Soustavy lineárních rovnic . . . . .	46
6.3	Výpočet inverzní matice pomocí Gaussovy metody . . . . .	49
6.4	Cramerovo pravidlo . . . . .	50
6.5	Charakteristický polynom, vlastní čísla a vlastní vektory matice . . . . .	52
6.6	Matice homomorfismů . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Sedmá přednáška</b>	<b>56</b>
7.1	Matice homomorfismů a přechodů . . . . .	56
7.2	Afinní prostory . . . . .	61

# 1 První přednáška

Matematika se historicky rodila jako celá řada disciplín, například jak tady máme jednu z nich, lineární algebra, nebo matematická analýza, teorie čísel a řada dalších...

Byly to takové historicky izolované disciplíny, v podobné situaci je dnes fyzika, ta má dnes také různé disciplíny a nedaří se je fyzikům spojit, i když se o to už dlouho pokoušejí a hledají tzv. teorii všeho. V matematice nějaká taková teorie všeho již byla nalezena a máme tu výhodu, že se podařilo najít ten „spojovací materiál“, kterým je logika a teorie množin.

Díky tomu se matematiku podařilo dostat na společný jazyk, takže ať už studujete teorii pravděpodobnosti, nebo matematickou analýzu, tak se začne s nějakou definicí, co je jakási množina a tak dále...

## 1.1 Logika

V logice je základním pojmem výrok, neboli tvrzení, o kterém můžeme říct, zda je pravdivé, nebo nepravdivé. Tedy přiřazujeme mu pravdivostní hodnotu, nulu, nebo jedničku. Výroky následně rozlišujeme na jednoduché (atomární), které nejdou dále rozložit a na výroky složité, které jsou pospojovány logickými spojkami. Nejznámější logické spojky jsou tyto:  $\wedge$ ,  $\vee$ ,  $\rightarrow$ ,  $\leftrightarrow$ . Zdaleka se však nejedná o jejich vyčerpávající výčet. Uvědomme si, že existuje  $2^4$  různých logických spojek (binárních).

Další nad čím je vhodné se z těchto základů pozastavit je pojem výroku. Ne všechno v běžné řeči je výrok. Je nutné si uvědomit, co výrok je a co není. A i když něco výrokem je, tak to ještě neznamená, že jsme schopni určit pravdivostní hodnotu tohoto výroku. Například tvrzení: *Na Saturnově měsíci je voda*, určitě se jedná o výrok, ale jeho pravdivostní hodnotu neznáme. Výrokem ale určitě nejsou různá zvolání, výkřiky, otázky...

Je každá dobře utvořená oznamovací věta výrokem? Není, například věta *Colorless green ideas sleep furiously*. je z mluvnického hlediska utvořena správně a jedná se o oznamovací větu, ale významově je to takový nesmysl, že nelze určit, zda se jedná o výrok, protože tomu nelze přiřadit pravdivostní hodnota a to ani hypotetická.

Pomocí těchto výroků a spojek se snažíme dokazovat věty. V matematice máme 4 základní kameny:

- Primitivní pojmy: pojmy, které se nedefinují a nevysvětlují, například bod.

- Definice: zavádějí pojmy, pomocí pojmů již známých, například definice prvočísla.
- Axiomy: tvrzení, která se nedokazují a která se považují za platná.
- Věty: tvrzení, které se musí dokázat a odvozují se z tvrzení již známých.

## 1.2 Teorie množin

Množina je primitivní pojem. I přesto, že se jedná o primitivní pojem, budeme si ho nějakým způsobem specifikovat, aby si každý z nás pod tímto primitivním pojmem představil to stejné.

### Primitivní pojem (Množina)

*Množina je nějaký soubor prvků, které se neopakují. Nad množinami jsou opět definovány nějaké operace, jako sjednocení, průnik, doplněk... Množiny a operace nad nimi můžeme vizualizovat například pomocí vennových diagramů.*

### Mohutnost

#### Primitivní pojem (Mohutnost množiny)

*Mohutnost množiny jednoduše udává počet jejích prvků. Mohutnost množiny  $A$  se značí jako  $|A|$ , nebo jako  $\text{card}(A)$ . Mohutnost prázdné množiny je 0,  $|\emptyset| = 0$ .*

#### Příklad (Mohutnost množiny)

*Nechť  $A = \{1, 2, 3\}$ . Potom  $|A| = \text{card}(A) = 3$ .*

#### Definice 1 (Mohutnost množiny přirozených čísel)

*Mohutnost množiny přirozených čísel definujeme jako „alef nula“:*

$$|\mathbb{N}| = \aleph_0$$

### Relace

Před zavedením relace je nutné nejprve definovat pojem kartézského součinu množin.

#### Definice 2 (Kartézský součin množin)

*Kartézský součin dvou množin se skládá z uspořádaných dvojic.*

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

#### Příklad (Kartézský součin množin)

*Mejme dvě množiny  $A$  a  $B$ :*

$$A = \{u, v\}, B = \{1, 2, 3\}$$

Jejich kartézský součin  $A \times B$  je potom:

$$A \times B = \{(u, 1), (u, 2), (u, 3), (v, 1), (v, 2), (v, 3)\}$$

### **Definice 3** (Relace)

Relace je libovolná podmnožina kartézského součinu.

$$R \subseteq A \times B, \text{ například: } R = \{(u, 1), (u, 2), (v, 1)\}$$

Relaci lze vyjádřit i graficky jako orientovaný graf.

Některé binární relace jsou zobrazení, neboli funkce<sup>1</sup>.

### **Definice 4** (Zobrazení)

Řekneme, že relace  $R \subseteq A \times B$  je zobrazení, jestliže:

$$(a, b_1) \in R \wedge (a, b_2) \in R \Rightarrow b_1 = b_2$$

Zobrazení  $f \subseteq A \times B$  můžeme značit jako:

$$f : A \rightarrow B$$

### **Definice 5** (Inverzní relace)

Uvažujme množiny  $A, B$  a binární relaci  $R \subseteq B \times A$ , potom pro inverzní relaci k relaci  $R$  platí:

$$R^{-1} \subseteq B \times A, (b, a) \in R^{-1} \Leftrightarrow (a, b) \in R$$

Inverzní relaci k relaci  $R$  budeme značit jako  $R^{-1}$

Neformálně řečeno je inverzní relace k relaci  $R$  stejná, jako relace  $R$ , jen v grafické reprezentaci otočíme šípky na druhou stranu.

### **Definice 6** (Definiční obor)

$$D(f) = \text{Dom}(f) = \{a \in A; \exists b \in B, f(a) = b\}$$

Budeme značit  $D(f)$ , nebo  $\text{Dom}(f)$ <sup>2</sup>.

### **Definice 7** (Obor hodnot)

$$H(f) = \text{Im}(f) = \{b \in B; \exists a \in A, f(a) = b\}$$

---

<sup>1</sup> funkce jim říkáme tehdy, když je cílová množina číselná.

<sup>2</sup> Z anglického Domain.

Budeme značit  $H(f)$ , nebo  $\text{Im}(F)$ <sup>3</sup>.

**Definice 8** (Injekce, prosté zobrazení)

Řekneme, že zobrazení  $f : A \rightarrow B$  je injekce (prosté zobrazení) jestliže:

$$f(a_1) = b \wedge f(a_2) = b \Rightarrow a_1 = a_2$$

Jestliže zobrazení  $f$  je injekce, potom inverzní relace je opět zobrazení (a opět injekce).

**Definice 9** (Surjekce)

Uvažujme zobrazení  $f : A \rightarrow B$

Potom řekneme, že zobrazení  $f$  je surjekce (zobrazení na), jestliže oborem hodnot je celá cílová množina, tedy právě tehdy, když:

$$H(f) = B$$

**Definice 10** (Bijekce)

Uvažujme zobrazení  $f : A \rightarrow B$

Jestliže je zobrazení  $f$  surjekce a současně injekce, řekneme, že se jedná o bijekci.<sup>4</sup>

Pokud existuje bijekce mezi konečnými množinami  $A$  a  $B$ , potom:

$$|A| = |B|$$

**Binární relace na množinách**

Relací na množině se rozumí binární relace, kde jsou oba prvky kartézského součinu tatáž množina, tedy  $R \subseteq A \times A$ . Speciální případy:

- Reflexivní relace:  $(a, a) \in R, \forall a \in A$ .
- Symetrická relace:  $(a, b) \in R \Rightarrow (b, a) \in R$ .
- Antisymetrická relace:  $(a, b) \in R \wedge (b, a) \in R \Rightarrow a = b$ .
- Tranzitivní relace:  $(a, b) \in R \wedge (b, c) \in R \Rightarrow (a, c) \in R$ .
- Ireflexivní relace:  $(a, a) \notin R, \forall a \in A$ .

**Definice 11** (Relace ekvivalence)

Relace, která je současně reflexivní, symetrická a tranzitivní se nazývá relace ekvivalence.

---

<sup>3</sup>Z anglického Image.

<sup>4</sup>Za bijekci se navíc velmi často považuje zobrazení, které je bijekce a zároveň v platí  $D(f) = A$ .

Relace ekvivalence vždy rozdělí původní množinu na disjunktní podmnožiny, kterým říkáme třídy ekvivalence.

**Definice 12** (Relace uspořádání)

Relace, která je reflexivní, antisymetrická a tranzitivní se nazývá relace uspořádání a vytvoří POSET (Partially Ordered SET).

## Operace

Operace je obecně zobrazení, konkrétní podoba tohoto zobrazení záleží na aritě operace.

Binární operace je zobrazení z kartézského součinu dvou množin do nějaké další množiny, velmi často jsou všechny tyto 3 množiny totožné.

$$f : A \times B \rightarrow C$$

## Konstrukce přirozených čísel

Z axiomů teorie množin víme, že prázdná množina existuje. Definujeme unární operaci následníka:

$$A' = A \cup \{A\}$$

Opakovanou aplikací operace následníka na původně prázdnou množinu jsme schopni vytvořit všechna přirozená čísla.

$$\emptyset' = \emptyset \cup \{\emptyset\} = \{\emptyset\}$$

$$\{\emptyset\}' = \{\emptyset\} \cup \{\{\emptyset\}\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$$

Definice operace plus (+) na takto definovaných přirozených číslech:

$$A + \emptyset = A$$

$$A + B' = (A + B)'$$

Definice operace krát (·) na takto definovaných přirozených číslech:

$$A \cdot \emptyset = \emptyset$$

$$A \cdot B' = A \cdot B + A$$



## Konstrukce celých čísel

Oproti přirozeným číslům musíme přidat nulu a záporné hodnoty. Můžeme k tomu využít relaci ekvivalence.

Uvažujme dvojice přirozených čísel:

$$(a, b) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$$

Potom řekneme, že:

$$(a, b) \sim (c, d) : a + d = b + c$$

### Věta 1

*Výše definovaná relace  $\sim$  je relace ekvivalence.*

*Důkaz.* Je třeba ověřit splnění vlastností, které z definice požadujeme od relace ekvivalence:

- $(a, b) \sim (a, b) : a + b = b + a$  Reflexivita
- $(a, b) \sim (c, d) \Rightarrow (c, d) \sim (a, b) : a + d = b + c \Rightarrow c + b = d + a$  Symetrie
- $(a, b) \sim (c, d) \wedge (c, d) \sim (e, f) \Rightarrow (a, b) \sim (e, f) : a + d = b + c \wedge c + f = d + e \Rightarrow a + f = b + e$  Transitivita

□

Množinu  $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$  tedy relace  $\sim$  rozdělí na třídy rozkladu, kde každá třída bude tvořena uspořádanými dvojicemi, se stejným rozdílem. Tyto třídy ekvivalence mohou reprezentovat všechna celá čísla.

## Konstrukce racionálních čísel

Racionální čísla narozdíl od celých a přirozených mají lepší vlastnosti, umožňují dělení. Racionální čísla jsou první obor, který se nazývá těleso, nebo také pole, pole/těleso racionálních čísel.

Uvažujme uspořádané dvojice celých čísel  $(a, b) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \setminus \{0\}$ . Na takovýchto dvojicích zavedeme následující relaci:  $(a, b) \sim (c, d) : a \cdot d = b \cdot c$ . Kde  $\cdot$  představuje násobení nad množinou celých čísel.

Opět tvrdíme, že relace  $\sim$  je relace ekvivalence a zase množinu  $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \setminus \{0\}$  rozdělí na třídy ekvivalence, kde jednotlivé třídy mohou reprezentovat všechna racionální čísla.

## 2 Druhá přednáška

### 2.1 Algebraické struktury

Algebraická struktura je množina, na které máme jednu, nebo více operací a tyto operace mají nějaké vlastnosti. Obecně  $(G, *)$  je algebraická struktura na množině  $G$  s operací  $*$ . Algebraických struktur je mnoho, nás bude zajímat převážně Grupa a Pole. Pokud bychom z následující definice grupy vypustili všechny 3 podmínky, jednalo by se o tzv. Grupoid (také označován jako Magma). Při splnění první podmínky tedy Magma a 1. podmínka, dostáváme tzv. Pologrupu. Následně Pologrupou a splněním podmínky číslo 2 dostáváme Monoid.

#### 2.1.1 Grupa

##### Definice 13 (Grupa)

Grupa  $(G, *)$  je algebraická struktura s jednou operací  $* : G \times G \rightarrow G$ , kde operace  $*$  splňuje následující vlastnosti:

1.  $a * (b * c) = (a * b) * c \quad \forall a, b, c \in G$  Asociativita
2.  $\exists e \in G : e * a = a * e = a \quad \forall a \in G$  Neutrální prvek
3.  $\forall a \in G, \exists a^{-1} \in G : a * a^{-1} = a^{-1} * a = e$  Inverzní prvky

##### Definice 14 (Komutativní „Abelova“ grupa)

Pokud k požadovaným vlastnostem operace  $*$  tvořící grupu přidáme ještě čtvrtou vlastnost:

4.  $a * b = b * a \quad \forall a, b \in G$  Komutativita

Dostaneme tzv. Abelovskou grupu.

Jako příklady grupy můžeme uvést  $(\mathbb{Z}, +)$ ,  $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot)$ ,  $(\mathbb{Q}, +)$ ,  $(\mathbb{R}, +)$ ,  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$  všechny tyto příklady jsou dokonce abelovskou grupou. Zajímavé je zamyslet se nad příkladem neabelovské grupy, kterým může být například grupa permutací (permutace s operací skládání s třemi a více prvky). Dalším příkladem neabelovské grupy je množina čtvercových regulárních matic s operací násobení.

#### Věta 2

Neutrální prvek je jediný.

Důkaz. Předpokládejme, že  $e_1$  a  $e_2$  jsou neutrální prvky. Budeme-li chtít na tyto dva neutrální prvky aplikovat operaci  $*$  podle definice neutrálního prvku vezmeme  $e_1$  jako neutrální a dostáváme:

$$e_1 * e_2 = e_2$$

Zároveň ale můžeme podle definice neutrálního prvku vzít  $e_2$  jako neutrální a v tom případě dostáváme:

$$e_1 * e_2 = e_1$$

Z toho vyplývá, že  $e_1$  a  $e_2$  jsou tentýž prvek a nemůže tedy nikdy existovat více než jeden neutrální prvek.  $\square$

### 2.1.2 Pole

#### Definice 15 (Pole)

Pole  $(F, +, \cdot)$  je algebraická struktura se dvěma operacemi, kde množina  $F$  má alespoň dva prvky, operace  $+$  splňuje následující vlastnosti<sup>5</sup>:

1.  $a + (b + c) = (a + b) + c \quad \forall a, b, c \in F$  Asociativita
2.  $\exists 0_f \in F : 0_f + a = a + 0_f = a \quad \forall a \in F$  Neutrální prvek
3.  $\forall a \in F, \exists -a \in F : a + (-a) = -a + a = 0_f$  Inverzní prvky
4.  $a + b = b + a \quad \forall a, b \in F$  Komutativita

a zároveň operace  $\cdot$  splňuje:

1.  $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c \quad \forall a, b, c \in F$  Asociativita
2.  $\exists 1_f \in F : 1_f \cdot a = a \cdot 1_f = a \quad \forall a \in F$  Neutrální prvek
3.  $\forall a \in F \setminus \{0_f\}, \exists a^{-1} \in F : a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1_f$  Inverzní prvky
4.  $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c \wedge (b + c) \cdot a = b \cdot a + c \cdot a \quad \forall a, b, c \in F$  Distributivita

#### Definice 16 (Komutativní pole)

Pokud se jedná o pole a navíc je operace  $\cdot$  komutativní, jedná se o komutativní pole:

5.  $a \cdot b = b \cdot a \quad \forall a, b \in F$  Komutativita

Zatím jediným příkladem pole, který z přednášek známe je  $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ .<sup>6</sup>

#### Definice 17 (Uspořádané pole)

Řekneme, že pole  $F$  je uspořádané, jestliže v něm existuje  $P \subseteq F$  tak, že je-li  $x, y \in P$  platí  $x + y \in P \wedge x \cdot y \in P$  a dále  $\forall x \in F$  platí, že splňuje právě jednu z následujících podmínek:

1.  $x \in P$

<sup>5</sup>Všimněte si, že jsou velmi podobné požadovaným vlastnostem na operaci  $*$  z definice Abelovy grupy.

<sup>6</sup>Dalším příkladem by mohlo být pole racionálních funkcí  $\mathbb{Z}(X)$ , které bylo později velmi okrajově zmíněno na přednášce.

$$2. -x \in P$$

$$3. x = 0_F$$

Jinak řečeno, uspořádané pole bude takové, ve kterém je možné nějakým způsobem vybrat „kladnou“ podmnožinu. Příklady uspořádaných polí:  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{Z}(x)$

Mejme uspořádané pole dle definice 17, potom zavedeme relaci  $<$  následovně:

$$a < b, \text{ jestliže } b - a \in P$$

Taková relace je ostré uspořádání<sup>7</sup>.

**Definice 18** (Husté pole)

*Řekneme, že pole  $F$  je husté, jestliže  $\forall a, b \in F, a < b$  existuje  $c \in F$  takové, že  $a < c < b$ .*

Příklady hustého pole:  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}$ .

**Definice 19** (Archimédovské pole)

*Řekneme, že uspořádané pole  $F$  je archimédovské, jestliže:*

$$\forall x, y \in P \exists n \in \mathbb{N}, n \cdot x > y$$

Příklady archimédovských polí:  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}$

### 2.1.3 Konečná pole

**Definice 20**

*Konečné pole je pole  $(F, +, \cdot)$ , kde množina  $F$  má konečný počet prvků.*

**Věta 3** (Existence konečného pole)

*Konečné pole  $(F, +, \cdot)$  existuje právě tehdy, když  $|F| = p^k$ , kde  $p$  je prvočíslo a  $k \in \mathbb{N}$ . Toto konečné pole je zároveň jediné.*

Z věty 3 vyplývá, že existují konečná pole se dvěma prvky, třemi prvky, se čtyřmi prvky, s pěti prvky, ale ne se šesti, protože 6 není ani prvočíslo, ani mocnina prvočísla.

Konečná pole budeme značit zdvojeným fontem a počtem prvků v dolním indexu např.  $\mathbb{F}_{11}$

Konečná pole si rozdělíme na dva případy a to na prvočíselná pole a na neprvočíselná pole.

Abychom porozuměli konečným polím a mohli s nimi pracovat, potřebujeme vědět, jak na nich fungují operace  $+$  a  $\cdot$ .

---

<sup>7</sup>To znamená, že je tato relace ireflexivní a tranzitivní

## Prvočíselná pole

### Definice 21 (Prvočíselné pole)

Prvočíselné pole je konečné pole  $(F, +, \cdot)$ , kde  $|F| = p$ ,  $p$  je prvočíslo. Tedy všechny případy, kdy pro  $k$  z věty 3 platí, že  $k = 1$ .

Například v prvočíselném poli  $\mathbb{F}_2$  máme 2 prvky a tyto prvky můžeme označit jak chceme, pro praktické počítání je však nejlepší označit tyto prvky čísly, v tomto případě od 0 do 1, kde 0 bude hrát roli hodnoty nula a 1 roli hodnoty jedna, tak jak potřebujeme.

### Příklad (Prvočíselné pole $\mathbb{F}_2$ )

$$\mathbb{F}_2 = \{0, 1\}$$

+	0	1			·	0	1
0	0	1			0	0	0
1	1	0			1	0	1

Tabulka 1: Operace  $+$  a  $\cdot$  nad  $\mathbb{F}_2$

Můžeme si všimnout, že u obou operací v tomto případě vlastně počítáme modulo 2, tedy modulo počet prvků pole, tato vlastnost platí obecně u prvočíselných polí.

### Příklad (Prvočíselné pole $\mathbb{F}_5$ )

$$\mathbb{F}_5 = \{0, 1, 2, 3, 4\}$$

+	0	1	2	3	4			·	0	1	2	3	4
0	0	1	2	3	4			0	0	0	0	0	0
1	1	2	3	4	0			1	0	1	2	3	4
2	2	3	4	0	1			2	0	2	4	1	3
3	3	4	0	1	2			3	0	3	1	4	2
4	4	0	1	2	3			4	0	4	3	2	1

Tabulka 2: Operace  $+$  a  $\cdot$  nad  $\mathbb{F}_5$

Z definice pole<sup>15</sup> vyplývá, že  $(\mathbb{F}_5, +)$  musí tvořit Abelovskou grupu. V Abelovské grupě platí, že při rozepsání operace do tabulky je v každém sloupci a v každém řádku každý prvek obsažen právě jednou<sup>8</sup>. Což si můžeme všimnout že zde platí.

<sup>8</sup>V počátcích definic teorie grup se tato vlastnost používala pro definici grupy.

U operace  $\cdot$  si můžeme všimnout, že bez prvního sloupce a bez prvního řádku (zeleně označená část) operace  $\cdot$  tvoří grupu. Tato vlastnost u pole a jeho operace  $\cdot$  platí vždy.

## Neprvočíselná pole

### Definice 22 (Neprvočíselné pole)

Neprvočíselné pole je konečné pole  $(F, +, \cdot)$ , kde  $|F| = p^k$ ,  $p$  je prvočíslo a zároveň  $k > 1, k \in \mathbb{N}$ . Tedy všechny případy, kdy pro  $k$  z věty 3 platí, že  $k > 1$ .

V případě neprvočíselných polí nebude fungování operací tak zřejmé jako tomu bylo u prvočíselných polí. Použitím stejného triku jako u prvočíselných polí, tedy použití běžných operací  $+$  a  $\cdot$  modulo počet prvků, totiž nejsme schopni vytvořit pole. Problém je v takovém případě operace  $\cdot$ , kdy pouze s přidáním modula nebude splňovat požadované vlastnosti z definice pole<sup>15</sup>.

Opět platí, že prvky pole můžeme označit jak chceme, ale je dobré, udělat to tak, aby se nám s nimi vhodně pracovalo. V případě neprvočíselných polí je pro jejich odvození vhodné označit si prvky jako polynomy v proměnné  $t$ , kde koeficienty jsou z  $\mathbb{F}_p$  až do stupně  $k - 1$ , kde  $n = p^k$  pro  $\mathbb{F}_n$ .

### Příklad (Definice pro $\mathbb{F}_4$ )

$$4 = 2^2, p = 2, k = 2$$

Polynomy v tomto případě tedy budou:

Polynomy	0	1	$t$	$t + 1$
Pomyslná hodnota	0	1	2	3

Tabulka 3: Vyjádření polynomů pro  $\mathbb{F}_4$

Pro vytvoření aditivní operace stačí sčítat polynomy v každém stupni modulo  $p$ .

### Příklad (Tvorba aditivní operace pro $\mathbb{F}_4$ )

Budeme sčítat polynomy v každém stupni modulo  $p$

$$2 + 3 = t + (t + 1) = \begin{array}{r} t \quad +0 \\ t \quad +1 \\ \hline 0 \quad +1 \end{array} = 1$$

$$1 + 1 = 1 + 1 = \frac{0t + 1}{0t + 0} = 0$$

$$1 + 2 = 1 + t = \frac{0t + 1}{t + 1} = 3$$

Stejným postupem pro ostatní hodnoty (některé jdou rovnou doplnit díky vlastnostem operace +) dostaneme kompletní tabulku definující aditivní operaci +.

+	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	0	3	2
2	2	3	0	1
3	3	2	1	0

Tabulka 4: Aditivní operace pro  $\mathbb{F}_4$

**Příklad** (Příklad polynomů pro  $\mathbb{F}_{125}$ )

$$125 = 5^3, \quad p = 5, \quad k = 3$$

Polynomy budou následující:

$$0, 1, 2, 3, 4, t, t + 1, t + 2, t + 3, t + 4, 2t + 1, \dots, 4t^2 + 4t + 3, 4t^2 + 4t + 4$$

Ukázka součtu dvou polynomů:

$$(4t + 2) + (t^2 + 2t + 3) = \frac{0t^2 + 4t + 2}{t^2 + 1t + 0} = t^2 + t$$

Při vytváření multiplikativní operace se nám stane, že po vynásobení dvou polynomů vznikne polynom stupně, který je větší, než  $k - 1$  a tedy není mezi polynomy daného pole. Budeme proto potřebovat tzv. redukční polynom.

**Definice 23** (Redukční polynom)

Redukční polynom  $P_{red}$  : polynom stupně  $k$ , který je nerozložitelný na součin polynomů stupně nižších (řekneme, že je ireducibilní).

**Příklad** (Hledání redukčního polynomu pro  $\mathbb{F}_4$ )

Všechny polynomy stupně  $k = 2$ :

- $t^2$  lze rozložit na  $t \cdot t$
- $t^2 + 1$  lze rozložit na  $(t + 1) \cdot (t + 1)$
- $t^2 + t$  lze rozložit na  $t \cdot (t + 1)$
- $t^2 + t + 1$  nelze rozložit

$$(t + 1) \cdot (t + 1) = \begin{array}{r} t \quad +1 \\ t \quad +1 \\ \hline t^2 \quad +t \\ t^2 \quad +0t \quad +1 \\ \hline \end{array} = t^2 + 1$$

Tvorba multiplikativní operace: po vynásobení dvou prvků z  $\mathbb{F}_{p^k}$  vyjádřených pomocí polynomů odečítáme (je-li třeba)  $t^h \cdot P_{red}$  tak dlouho, až je výsledek stupně nejvýše  $k - 1$ .

**Příklad** (Aplikace multiplikativní operace v  $\mathbb{F}_4$  a využití  $P_{red}$ )

$$t \cdot (t + 1) = t^2 + t$$

Polynom  $t^2 + t$  má ale příliš vysoký stupeň (vyšší, než  $k - 1$ ). Začneme proto s odečítáním redukčního polynomu<sup>9</sup>, který je v tomto případě  $t^2 + t + 1$ .

$$(t^2 + t) - (t^2 + t + 1) = \begin{array}{r} t^2 \quad +t \quad +0 \\ -(t^2 \quad +t \quad +1) \\ \hline 0t^2 \quad +0t \quad +1 \end{array} = 1$$

**Příklad** (Tvorba tabulky multiplikativní operace v  $\mathbb{F}_4$ )

Hodnoty pro 0 a 1 jsou jasné. V předchozím příkladu jsme spočítali, že  $3 \cdot 2 = 1$ , díky čemuž zároveň víme že,  $2 \cdot 3 = 1$ . Ostatní hodnoty jsme již schopni doplnit díky požadovaným vlastnostem operace  $\cdot$ . Ale pojďme ověřit  $2 \cdot 2$ .

<sup>9</sup>Můžeme odečítat i jeho  $t^h$  násobky, ale v tomto případě stačí redukční polynom sám o sobě.



$$2 \cdot 2 = t \cdot t = t^2$$

Stupeň polynomu je větší, než  $k - 1$ . Odečteme  $T_{red}$ .

$$t^2 - (t^2 + t + 1) = \frac{\begin{matrix} t^2 & +0t & +0 \\ -(t^2 & +t & +1) \\ \hline 0t^2 & +t & +1 \end{matrix}}{0t^2 + t + 1} = t + 1 = 3$$

$\cdot$	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	2	3
2	0	2	3	1
3	0	3	1	2

Tabulka 5: Multiplikativní operace pro  $\mathbb{F}_4$

## 2.2 Konstrukce množiny reálných čísel

Využijeme definici reálných čísel pomocí Dedekindových řezů.

**Definice 24** (Dedekindův řez)

Dedekindův řez  $D$  je podmnožina racionálních čísel  $D \subseteq \mathbb{Q}$ , která splňuje:

$$1. x \in D \Rightarrow \exists y > x, y \in D$$

*Neexistence největšího prvku*

$$2. x \in D, y < x \Rightarrow y \in D$$

Příklady Dedekindových řezů:

- $\mathbb{Q}$  tento řez označme  $\infty$
- $\emptyset$  tento řez označme  $-\infty$
- $\mathbb{Q}^-$
- $\{x \in \mathbb{Q}; x < 7\}$
- $\{x \in \mathbb{Q}; x \cdot x < 2 \vee x < 0\}$

Budeme-li uvažovat všechny Dedekindovy řezy, dostaneme množinu rozšířených reálných čísel, kterou budeme označovat  $\overline{\mathbb{R}}$ .

Potom

$$\mathbb{R} = \overline{\mathbb{R}} \setminus \{-\infty, \infty\}$$

Kde  $\mathbb{R}$  označuje množinu reálných čísel.

**Definice 25** (Součet Dedekindových řezů)

$$D + E = \{x + y; x \in D, y \in E\}$$

**Definice 26** (Nezáporný Dedekindův řez)

Řekneme, že dedekindův řez  $D$  je nezáporný právě tehdy, když:

$$D \supseteq \mathbb{Q}^+$$

**Definice 27** (Součin Dedekindových řezů)

Předpokládáme, že řezy  $D$  a  $E$  jsou nezáporné.

$$D \cdot E = \{x \cdot y; \forall x, y \geq 0, x \in D, y \in E\} \cup \{z; z < 0, z \in \mathbb{Q}\}$$

Pokud je jeden z řezů záporný a druhý nezáporný, potom musíme definovat opačný řez, k zápornému řezu vyrobit řez opačný, použijeme násobení nezáporných řezů a z výsledku opět vyrobíme řez opačný.

Pokud budou oba řezy záporné, z obou řezů vezmu opačné řezy, použiji násobení nezáporných řezů a dostanu korektní výsledek.<sup>10</sup>

## Komplexní čísla

Uvažujme  $\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2$ . V  $\mathbb{R}^2$  není definována multiplikativní operace  $(a, b) \cdot (c, d)$ . Pokud v  $\mathbb{R}^2$  multiplikativní operaci definujeme takovým způsobem, aby splňovala vlastnosti na multiplikativní operaci z definice pole<sup>15</sup>, dostáváme:

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

Což je totéž jako

$$(a + bi) \cdot (c + di) = ac + (b + d)i^2 + a \cdot di + bi \cdot c = ac - bd + (ad + bc)i, \quad i^2 = -1$$

Přidáním této operace dostaneme množinu komplexních čísel  $\mathbb{C}$ , která opět tvoří strukturu pole.

Byly snahy tento postup zobecnit. Pro  $\mathbb{R}^3$  avšak vhodná multiplikativní operace, která by vyhovovala požadavkům z definice pole<sup>15</sup> neexistuje.

---

<sup>10</sup>Násobení dedekindových řezů bylo na přednášce definováno pouze takto částečně.

Pro  $\mathbb{R}^4$  už multiplikativní operaci splňující požadované vlastnosti vytvořit lze, tím dostáváme tzv. kvaterniony, značíme je  $\mathbb{H}$ . Opět máme „pomůcky“ a pravidla pro jejich násobení. Kvaterniony zapisujeme ve tvaru:

$$a + bi + cj + dk$$

A pravidla pro jejich násobení jsou:

$$1. \quad i^2 = j^2 = k^2 = -1$$

$$2. \quad ij = -ji = k$$

U kvaternionů však máme jednu změnu, nejedná se o komutativní pole (je to zřejmé z druhého pravidla) a jsou tedy prvním příkladem nekomutativního pole se kterým jsme se v přednáškách zatím setkali.

## 2.3 Mohutnosti nekonečných množin

Kardinalita nejvšednější nekonečné množiny, přirozených čísel, je definována jako „alef 0“

$$|\mathbb{N}| = \aleph_0$$

Jakákoliv jiná nekonečná množina bude mít stejnou kardinalitu, pokud existuje bijekce mezi touto nekonečnou množinou a množinou přirozených čísel.

$\mathbb{N}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
$\mathbb{N}_0$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
$2\mathbb{N} + 1$	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	...
$\mathbb{Z}$	0	1	-1	2	-2	3	-3	4	-4	5	...
$\mathbb{Q}$	$\frac{0}{1}$	$\frac{-1}{1}$	$\frac{-2}{1}$	$\frac{-1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{-3}{1}$	$\frac{-1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{1}$	...

Tabulka 6: Ukázka některých bijekcí s přirozenými čísly

Z bijekcí naznačených v tabulce 6 vyplývá:

$$|\mathbb{N}| = |\mathbb{N}_0| = |2\mathbb{N} + 1| = |\mathbb{Z}| = |\mathbb{Q}| = \aleph_0$$

### Mohutnost množiny reálných čísel

Mohutnost množiny reálných čísel je větší, než mohutnost množiny celých čísel.

$$|\mathbb{R}| > |\mathbb{N}|$$

*Důkaz.* Neexistence bijekce mezi  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{N}$

$$\begin{array}{cccccc}
a_1 = & 0, & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots \\
a_2 = & 0, & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots \\
a_3 = & 0, & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots
\end{array}$$

Tabulka 7: Seřazení hodnot reálného intervalu  $(0, 1)$

Předpokládejme, že bijekce mezi  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{N}$  existuje. Vezměme reálný interval  $(0, 1)$  a předpokládejme, že jeho prvky lze seřadit<sup>11</sup>.

Za předpokladu, že jsme schopni hodnoty tohoto intervalu seřadit, jsme schopni je všechny reprezentovat nekonečnou tabulkou 7.

Ted' vytvoříme číslo  $b = 0, b_1 b_2 b_3 \dots$ , kde každou číslici  $b_i$  určíme následovně:

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{pokud } a_{ii} \neq 1 \\ 2 & \text{pokud } a_{ii} = 1 \end{cases}$$

Tím jsme ale zkonstruovali reálné číslo  $b$ , které se liší<sup>12</sup> od každého čísla v tabulce 7.

Z našich předpokladů však vycházelo, že v tabulce musí být obsažena všechna čísla z daného intervalu. Dostáváme tedy spor a z toho vychází, že naše předpoklady nebyly správné a neexistuje bijekce mezi  $\mathbb{N}$  a reálným intervalem  $(0, 1)$ . Tím pádem nemůže existovat bijekce ani mezi  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{N}$ .

Z důkazu nám zároveň vychází, že  $|\mathbb{R}| > |\mathbb{N}|$ . □

Kardinalitu reálných čísel budeme značit  $c$

$$|\mathbb{R}| = c > \aleph_0$$

**Definice 28** (Kardinalita potenčních množin přirozených čísel)

Značíme pomocí  $\aleph_i$

$$|P(\mathbb{N})| = \aleph_1$$

$$|P(P(\mathbb{N}))| = \aleph_2$$

$$|P(P(P(\mathbb{N})))| = \aleph_3$$

$$\vdots$$

Kde

$$\aleph_0 < \aleph_1 < \aleph_2 < \aleph_3 \dots$$

<sup>11</sup>Tento předpoklad vychází z předpokladu, že existuje bijekce s  $\mathbb{N}$ .

<sup>12</sup>A to alespoň v jedné číslici na diagonále (zobrazeno modře).

*Důkaz.* Neexistence bijekce mezi  $\mathbb{N}$  a  $P(\mathbb{N})$

Předpokládejme, že  $f : \mathbb{N} \rightarrow P(\mathbb{N})$  je bijekce.

Nyní uvažujme množinu

$$D = \{n \in \mathbb{N}; n \notin f(n)\}$$

$D$  je nějaká podmnožina všech přirozených čísel  $a$ , kde bijekce  $f$  zobrazí  $a$  na podmnožinu, která číslo  $a$  neobsahuje.

Vzhledem k tomu, že  $D \subseteq \mathbb{N}$ , musí platit  $D \in P(\mathbb{N})$ , pak

$$\exists m \in \mathbb{N} : f(m) = D$$

Potom ale

$$m \in D \Leftrightarrow m \notin D$$

Čímž se dostáváme ke sporu a bijekce  $f$  jejíž existenci jsme předpokládali neexistuje. □

Není jednoznačné, zda  $\aleph_1 = c$ <sup>13</sup>.

### Mohutnost množiny komplexních čísel

$$|\mathbb{C}| = |\mathbb{R}^2| = |\mathbb{R}| = c$$

Což ovšem znamená, že musíme být schopni najít bijekci mezi  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{R}^2$ .

Toho dosáhneme následovně, každé reálné číslo zobrazíme na uspořádanou dvojici takto:

$$0,3451239956\dots \rightarrow (0,35295\dots; 0,41396\dots)$$

Tímto způsobem jsme schopni obecně najít bijekci mezi  $\mathbb{R}$  a  $\mathbb{R}^n$ .

---

<sup>13</sup>Jedná se o nezávislý axiom.

### 3 Třetí přednáška

#### 3.1 Vektorový prostor

**Definice 29** (Vektorový prostor)

*Vektorový prostor je především Abelovská grupa*

$$(\mathcal{V}, +)$$

*Kromě operace  $+$  budeme mít další operaci vztaženou k nějakému poli  $(F, +, \cdot)$  a to operaci*

$$\cdot : F \times \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{V}$$

*této operaci budeme říkat násobení skalárem a bude mít následující vlastnosti:*

1.  $a \cdot (\vec{u} + \vec{v}) = a \cdot \vec{u} + a \cdot \vec{v}, \forall a \in F \forall \vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{V}$
2.  $(a + b) \cdot \vec{u} = a \cdot \vec{u} + b \cdot \vec{u}, \forall a, b \in F \forall \vec{u} \in \mathcal{V}$
3.  $(a \cdot b) \cdot \vec{u} = a \cdot (b \cdot \vec{u}), \forall a, b \in F \forall \vec{u} \in \mathcal{V}$
4.  $1 \cdot \vec{u} = \vec{u}, \forall \vec{u} \in \mathcal{V}$

*Tedy pokud máme nějaké pole  $F$ , nějakou abelovskou grupu  $\mathcal{V}$  a definovanou operaci násobení skalárem  $\cdot$  s uvedenými vlastnostmi. Potom řekneme, že  $\mathcal{V}$  je vektorovým prostorem nad polem  $F$ .*

*Prvkům  $\mathcal{V}$  pak budeme říkat vektory. Prvkům  $F$  často říkáme skaláry, nebo čísla.*

**Příklad** (Příklad vektorového prostoru)

$$F = \mathbb{R}, \mathcal{V} = \mathbb{R}^3$$

$$\vec{u} + \vec{v} = (u_1 + v_1, u_2 + v_2, u_3 + v_3) \forall \vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{V}$$

*Je  $(\mathcal{V}, +)$  abelovská grupa?*

0. Operace  $+$  je zjevně uzavřená na množině  $\mathbb{R}^3$ .
1. Asociativita vychází z asociativity sčítání v  $\mathbb{R}$ .
2. Neutrálním prvkem je:  $\vec{0} = (0, 0, 0)$ .
3. Inverzní prvek k prvku  $u$  dostaneme jako:  $-\vec{u} = (-u_1, -u_2, -u_3)$ .
4. Komutativita je v tomto případě také jasná.

$(\mathcal{V}, +)$  je tedy abelovská grupa<sup>14</sup>.

operaci násobení skalárem  $\cdot$  zavedeme takto:

$$a \cdot (u_1, u_2, u_3) = (a \cdot u_1, a \cdot u_2, a \cdot u_3)$$

Je zřejmé, že tato operace splňuje všechny požadované vlastnosti z definice vektorového prostoru 29. Pojďme ověřit například třetí vlastnost:

Důkaz. Platnost třetí vlastnosti:

$$LS : (a \cdot b) \cdot (u_1, u_2, u_3) = (a \cdot b \cdot u_1, a \cdot b \cdot u_2, a \cdot b \cdot u_3)$$

$$PS : a \cdot (b \cdot (u_1, u_2, u_3)) = a \cdot (b \cdot u_1, b \cdot u_2, b \cdot u_3) = (a \cdot b \cdot u_1, a \cdot b \cdot u_2, a \cdot b \cdot u_3)$$

$$LS = PS$$

□

Ověření platnosti požadovaných vlastností bylo v případě 3.1 triviální. Podobně jednoduchý postup by šel použít i pro případy, kdy obecně  $\mathcal{V} = \mathbb{R}^n, \forall n \in \mathbb{N}$ . Existují však příklady, ke kterým se dostaneme později, kdy ověření platnosti není tak jednoduché.

**Definice 30** (Triviální vektorový prostor)

Uvažujme libovolné pole  $F$  a abelovskou grupu

$$(\mathcal{V}, +), \mathcal{V} = \{\vec{0}\}$$

Což je zároveň minimální případ grupy, protože ta z definice vždy musí obsahovat minimálně jeden prvek, kterým je neutrální prvek.

A operaci násobení skalárem zavedeme takto:

$$a \cdot \vec{0} = \vec{0}, a \in F, \vec{0} \in \mathcal{V}$$

Opět budou splněny všechny požadované vlastnosti, jedná se tedy o vektorový prostor a tento vektorový prostor budeme označovat jako triviální vektorový prostor.

Dalším jednoduchý příklad vektorového prostoru: libovolné pole  $F$ ,  $\mathcal{V} = F^n, n \in \mathbb{N}$

**Příklad** (Je  $\mathbb{R}$  vektorový prostor nad  $\mathbb{Q}$ ?)

---

<sup>14</sup>Otázka k zamyšlení je, zda by bylo možné operaci  $+$  zavést nějak jinak a stále dodržet všechny požadované vlastnosti.

$$F = \mathbb{Q}, \mathcal{V} = \mathbb{R}$$

Víme, že  $\mathbb{R}$  s běžnou operací  $+$  tvoří Abelovskou grupu. Násobení skalárem zavedeme jako běžné násobení. To že platí vlastnosti z definice vektorového prostoru<sup>29</sup> plyne z vlastností běžné operace násobení  $\cdot$  na množině  $\mathbb{R}$ .

Takže ano, v tomto případě se jedná o vektorový prostor.

Další příklady vektorových prostorů:

- $F = \mathbb{R}, \mathcal{V} = C^0\langle a, b \rangle$ <sup>15</sup>
- $F = \mathbb{R}, \mathcal{V} = C^1\langle a, b \rangle$
- $F = \mathbb{R}, \mathcal{V} =$  množina matic o velikosti  $n \times n$
- $F = \mathbb{Q}, \mathcal{V} = \mathbb{R}$
- $F = \mathbb{R}, \mathcal{V} = \mathbb{C}$
- A dokonce i  $F = \mathbb{C}, \mathcal{V} = \mathbb{R}$ , v tomto případě však bude vytvoření vhodných operací netriviální.

**Definice 31** (Vektorový podprostor)

Nechť  $\mathcal{V}$  je vektorový prostor

$$\mathcal{W} \subseteq \mathcal{V}$$

A zároveň platí tyto vlastnosti:

1.  $\vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{W} \Rightarrow \vec{u} + \vec{v} \in \mathcal{W}$
2.  $\vec{u} \in \mathcal{W}, a \in F \Rightarrow a \cdot \vec{u} \in \mathcal{W}$

Pokud je  $\mathcal{W}$  podmnožina  $\mathcal{V}$  a zároveň splňuje dvě výše uvedené vlastnosti, potom řekneme, že  $\mathcal{W}$  je vektorovým podprostorem vektorového prostoru  $\mathcal{V}$ .

Sjednocení dvou vektorových podprostorů obecně není vektorový podprostor. Naopak průnik podprostorů je vždy podprostor.

**Příklad** (Ověření vektorového podprostoru)

Mějme

$$F = \mathbb{R}, \mathcal{V} = \mathbb{R}^3$$

$$\mathcal{W}_1 = \{(a, 2 \cdot a, 1), a \in \mathbb{R}\}$$

Je  $\mathcal{W}_1$  vektorový podprostor  $\mathcal{V}$ ?

---

<sup>15</sup> $C^n\langle a, b \rangle$  značí množinu funkcí na reálném intervalu  $\langle a, b \rangle$ , které jsou spojité až do  $n$ -té derivace,  $n \in \mathbb{N}$ .



0. Je zřejmé, že  $\mathcal{W}_1 \subseteq \mathbb{R}^3$

$$1. (a, 2 \cdot a, 1) + (b, 2 \cdot b, 1) = (a + b, 2 \cdot a + 2 \cdot b, 2) \notin \mathcal{W}_1$$

První podmínka tedy není splněna a  $\mathcal{W}_1$  v tomto případě není vektorovým podprostorem vektorového prostoru  $\mathcal{V}$ .

Nyní uvažme  $\mathcal{W}_2$  definované následovně:

$$\mathcal{W}_2 = \{(a, 2 \cdot a, 0), a \in \mathbb{R}\}$$

0. Opět je zřejmé, že  $\mathcal{W}_2 \subseteq \mathbb{R}^3$

$$1. (a, 2 \cdot a, 0) + (b, 2 \cdot b, 0) = (a + b, 2 \cdot (a + b), 0) = (c, 2 \cdot c, 0) \in \mathcal{W}$$

$$2. a \cdot (b, 2b, 0) = (a \cdot b, 2 \cdot a \cdot b, 0) = (c, 2c, 0) \in \mathcal{W}$$

Všechny požadované vlastnosti platí a  $\mathcal{W}$  je tedy vektorový podprostor vektorového prostoru  $\mathcal{V}$ .

## 3.2 Matice

Intuitivně můžeme matici definovat jako čísla, která jsou uspořádaná do obdélníkového schématu.

### Definice 32 (Matice)

Uvažujme zobrazení  $a$  definované takto:

$$a = \{1 \dots m\} \times \{1 \dots n\} \rightarrow F$$

Toto zobrazení vlastně přiřazuje dvojici indexů (sloupcový a řádkový) hodnotu, která se v matici nachází na daném indexu. Indexy budeme značit dolním indexem jako  $a_{mn}$

Psát matice jako zobrazení by bylo silně nepraktické, proto nadále budeme využívat právě ono uspořádání čísel do obdélníkového schématu a označovat je velkými písmeny.

Prvky  $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{kk}, k = \min(m, n)$  budeme označovat jako hlavní diagonálu.

Dále budeme často používat indexování pomocí  $i, j$ , kde

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, n$$

### Příklad (Matice)

Mějme matici  $A$  definovanou takto:

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 2 & 1 & -5 \\ 2 & \sqrt{2} & 3 & -\frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Potom  $a(2, 2) = a_{22} = \sqrt{2}$ ,  $a(2, 4) = a_{24} = -\sqrt{13}$

### 3.3 Speciální případy matic

Mezi maticemi rozlišujeme celou řadu speciálních případů. Některé z nich jsou pouze pro případ matic čtvercových, ale některé se dají definovat i obecně pro obdélníkové matice.

**Definice 33** (Horní trojúhelníková matice)

Jestliže jsou v matici  $A$  všechny prvky pod hlavní diagonálou 0, řekneme že matice  $A$  je horní trojúhelníková.

Řečeno formálně, v matici musí platit:

$$i < j \Rightarrow a_{ij} = 0$$

Podobně je definovaná dolní trojúhelníková matice, pouze se  $i < j$  změní na  $i > j$ .

**Definice 34** (Diagonální matice)

Jestliže jsou v matici  $A$  všechny prvky mimo hlavní diagonálu 0, řekneme že matice  $A$  je diagonální.

Řečeno formálně, v matici musí platit:

$$i \neq j \Rightarrow a_{ij} = 0$$

**Definice 35** (Nulová matice)

Jestliže jsou v matici  $A$  všechny prvky 0, řekneme že matice  $A$  je nulová.

Řečeno formálně, v matici musí platit:

$$\forall i, j : a_{ij} = 0$$

**Definice 36** (Jednotková matice)

Jestliže je matice  $A$  diagonální a zároveň jsou všechny hodnoty na hlavní diagonále 1, řekneme, že matice  $A$  je jednotková.

Řečeno formálně, v matici musí platit:

$$a_{ij} = \delta_{ij}^{16} = \begin{cases} 1 & \text{pro } i = j \\ 0 & \text{pro } i \neq j \end{cases}$$

Jednotkovou matici budeme značit  $E$ .

---

<sup>16</sup>Kroneckerovo delta

### 3.4 Základní operace na maticích

Množinu všech matic o  $m$  řádcích a  $n$  sloupcích nad polem  $F$  budeme označovat následovně

$$\text{Mat}_{m,n}(F)$$

**Definice 37** (Součet matic)

$$+ : \text{Mat}_{m,n}(F) \times \text{Mat}_{m,n}(F) \rightarrow \text{Mat}_{m,n}(F)$$

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \quad \forall i, j$$

*Tato operace je uzavřená, asociativní, má definovaný neutrální i inverzní prvek a navíc je komutativní.*

*A tvoří tedy Abelovskou grupu  $(\text{Mat}_{m,n}(F), +)$*

**Definice 38** (Násobení matice skalárem)

$$\cdot : F \times \text{Mat}_{m,n}(F) \rightarrow \text{Mat}_{m,n}(F)$$

$$b_{ij} = k \cdot a_{ij}$$

*Tato operace splňuje požadavky pro operaci násobení skalárem z definice vektorového prostoru 3.1.*

*A  $\text{Mat}_{m,n}(F)$  v kombinaci s operací  $+$  z definice součtu matic 37 a s touto operací  $\cdot$  tvoří vektorový prostor:*

$$(\text{Mat}_{m,n}(F), +, \cdot)$$

**Definice 39** (Transpozice matice)

$$\text{Mat}_{m,n}(F) \rightarrow \text{Mat}_{n,m}(F)$$

$$B = A^T$$

$$b_{ji} = a_{ij}$$

$$(A^T)^T = A$$

$$(A + B)^T = A^T + B^T$$

**Definice 40** (Násobení matic)

$$\cdot : \text{Mat}_{m,n}(F) \times \text{Mat}_{n,p}(F) \rightarrow \text{Mat}_{m,p}(F)$$

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{kj}$$

*Tato operace nemusí být vždy definována (musí správně sedět dimenze). Je to operace asociativní. Ale není komutativní.*

*Omezíme li se na čtvercové regulární matice řádu  $n$ , dostaneme v kombinaci s touto operací strukturu grupy.*

## 4 Čtvrtá přednáška

### 4.1 Vektorové prostory

**Definice 41** (Lineární obal)

Mějme množinu  $M \subseteq \mathcal{V}$

Budeme uvažovat průnik všech vektorových podprostorů vektorového prostoru  $\mathcal{V}$ , které obsahují  $M$ . Množinu která z těchto průniků vznikne označíme jako lineární obal množiny  $M$ .

Lineární obal množiny  $M$  budeme označovat jako  $\langle M \rangle$

**Definice 42** (Lineární kombinace)

Mějme nějaké vektory:

$$\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$$

Potom můžeme uvažovat jiný vektor  $\vec{v}$  ve tvaru:

$$\vec{v} = c_1 \cdot \vec{u}_1 + \dots + c_n \cdot \vec{u}_n$$

Takovému vektoru  $v$  potom říkáme lineární kombinace vektorů  $u_1, \dots, u_n$

Zároveň platí, že vektor  $\vec{v}$  je lineárně závislý na vektorech  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$

**Věta 4** (Rovnost množiny všech lin. kombinací a lineárního obalu)

Mějme množinu  $M \subseteq \mathcal{V}$

Pro zjednodušení označme množinu všech lineárních kombinací vektorů z množiny  $M$  jako  $lcM$ <sup>17</sup>

Potom tvrdíme:

$$\langle M \rangle = lcM$$

*Důkaz.* Chceme ukázat, že platí:

$$\langle M \rangle \subseteq lcM \wedge \langle M \rangle \supseteq lcM$$

Pomocné tvrzení:  $lcM$  je vektorový podprostor:

1. Sečtením dvou lineárních kombinací z  $lcM$  dostaneme opět lineární kombinaci z  $lcM$ .
2. Vynásobením lineární kombinace z  $lcM$  skalárem dostáváme lineární kombinaci z  $lcM$ .

$lcM$  je tedy vektorový podprostor. A pro každý vektor  $\vec{v} \in M$  určitě existuje lineární kombinace  $\vec{c}$  taková, že  $\vec{v} = \vec{c} \cdot lcM$  tedy určitě obsahuje  $M$ .

---

<sup>17</sup>Pouze dočasně, toto označení nebudeme běžně používat.

Důkaz pro  $\langle M \rangle \subseteq lcM$ : plyne z toho, že  $lcM$  je vektorový podprostor obsahující  $M$  a z toho, že  $\langle M \rangle$  je průnik všech takových vektorových podprostorů. A průnik je určitě podmnožinou.

Důkaz pro  $\langle M \rangle \supseteq lcM$ :

$$\vec{v} \in lcM \Rightarrow \vec{v} = c_1 \cdot \vec{u}_1 + \dots + c_n \cdot \vec{u}_n, \vec{u} \in M$$

Potom:

$$\vec{u}_i \in \mathcal{W} \quad \forall \text{ vektorové podprostory } \mathcal{W} \subseteq \mathcal{V}$$

$$c_1 \cdot \vec{u}_1 + \dots + c_n \cdot \vec{u}_n \quad \forall \text{ vektorové podprostory } \mathcal{W} \subseteq \mathcal{V}$$

to znamená, že  $\vec{v} \in \bigcap_i \mathcal{W}_i$

□

Označení  $lcM$  nebudeme nadále používat, protože jak jsme ukázali, jedná se vlastně o ekvivalentní definici lineárního obalu.

**Definice 43** (Lineární nezávislost vektorů)

Uvažujme množinu vektorů:

$$(\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)$$

Řekneme, že vektory  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n$  jsou lineárně nezávislé, jestliže:

$$c_1 \cdot \vec{u}_1 + \dots + c_n \cdot \vec{u}_n = \vec{0} \Rightarrow \forall c_i = 0$$

**Definice 44** (Báze vektorového podprostoru)

Báze  $\mathcal{B}$  vektorového podprostoru  $\mathcal{W}$  je uspořádaná  $n$ -tice lineárně nezávislých vektorů, které generují  $\mathcal{W}$ . Kde generují znamená, že  $\langle \mathcal{B} \rangle = \mathcal{W}$ .

**Příklad** (Příklad báze vektorového podprostoru)

$$\mathcal{W} = \mathcal{V} = \mathbb{R}^3$$

$$\mathcal{B} = ((1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1))$$

Je  $\mathcal{B}$  báze vektorového podprostoru  $\mathcal{W}$ ?

$$1. (a, b, c) = a \cdot (1, 0, 0) + b \cdot (0, 1, 0) + c \cdot (0, 0, 1)$$

$\mathcal{B}$  generuje celé  $\mathcal{W}$

$$2. c_1 \cdot (1, 0, 0) + c_2 \cdot (0, 1, 0) + c_3 \cdot (0, 0, 1) = (0, 0, 0) \Rightarrow c_1 = 0, c_2 = 0, c_3 = 0$$

$\mathcal{B}$  je lineárně nezávislé

A  $\mathcal{B}$  je tedy báze vektorového podprostoru  $\mathcal{W}$ .

**Definice 45** (Dimenze vektorového prostoru)

Počet prvků báze  $\mathcal{B}$  budeme označovat jako dimenzi vektorového prostoru  $\langle \mathcal{B} \rangle$

### Příklad (Báze vektorového prostoru matic)

Uvažujme:

$$\mathcal{V} = \text{Mat}_{2,3}(\mathbb{R})$$

Potom bázi můžeme určit jako:

$$\mathcal{B} = \left( \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right)$$

A vidíme, že dimenze tohoto vektorového prostoru je 6.

Což dává smysl mimo jiné díky tomu, že v případě  $\text{Mat}_{2,3}$  v podstatě pracujeme s  $\mathbb{R}^6$  pouze s tím, že jsme prvky uspořádali do obdélníku. Tato změna uspořádání nemá z hlediska aditivní grupy a vektorového prostoru jako takového žádný zvláštní význam a změna se projeví až ve chvíli, kdy začneme matice násobit.

#### 4.1.1 Speciální zobrazení mezi vektorovými prostory

##### Definice 46 (Homomorfismus vektorových prostorů)

Uvažujme dva vektorové prostory  $\mathcal{V}, \mathcal{W}$  a zobrazení  $\varphi$ :

$$\varphi: \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$$

kde  $\varphi$  bude mít následující vlastnosti:

$$1. \quad \varphi(\vec{v}_1 + \vec{v}_2) = \varphi(\vec{v}_1) + \varphi(\vec{v}_2) \quad \forall \vec{v}_1, \vec{v}_2 \in \mathcal{V}$$

Zachování součtu

$$2. \quad \varphi(k \cdot \vec{v}) = k \cdot \varphi(\vec{v}) \quad \forall \vec{v} \in \mathcal{V} \quad \forall k \in F$$

Zachování násobení skalárem

Neformálně řeceno  $\varphi$  je zobrazení, které zachovává operace.

Potom zobrazení  $\varphi$  nazýváme homomorfismus<sup>18</sup> (vektorových prostorů).

##### Příklad (Homomorfismus vektorových prostorů)

$$\mathcal{V} = \mathbb{R}^2, \mathcal{W} = \mathbb{R}^4$$

$$\varphi(\vec{v}) = \vec{w}$$

$$\vec{w} = (v_1, 0, v_1, v_1 + v_2)$$

$$\varphi((1, 2)) = (1, 0, 1, 3)$$

Je takto definované  $\varphi$  homomorfismus? Musí platit podmínky z definice homomorfismu 46.

<sup>18</sup>Někdy se také používá pojem lineární zobrazení.

První podmínka:

$$LS = \varphi(\vec{u} + \vec{v}) = \varphi(u_1 + v_1, 0, u_1 + v_1 + u_2 + v_2), \vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^2$$

$$PS = \varphi(\vec{u}) + \varphi(\vec{v}) = (u_1, 0, u_1 + u_2) + (v_1, 0, v_1 + v_2) = (u_1 + v_1, 0, u_1 + u_2 + v_1 + v_2), \vec{u}, \vec{v} \in \mathbb{R}^2$$

$$LS = PS$$

První podmínka tedy platí a stejným postupem by bylo možné ukázat i platnost druhé podmínky, jedná se tedy o homomorfismus.

**Definice 47** (Jádro a obraz homomorfismu)

Uvažujme vektorový prostor  $\mathcal{V}$  a homomorfismus  $\varphi$ , potom je kernel  $\ker$  homomorfismu  $\varphi$  definován takto:

$$\ker \varphi = \{\vec{v} \in \mathcal{V}; \varphi(\vec{v}) = \vec{0}\}$$

A obraz  $\operatorname{im}$  homomorfismu  $\varphi$  je definován takto:

$$\operatorname{im} \varphi = \{\vec{w} \in \mathcal{W}; \exists \vec{v} \in \mathcal{V} \text{ tak, že } \varphi(\vec{v}) = \vec{w}\}$$

**Věta 5** ( $\ker \varphi$  a  $\operatorname{im} \varphi$  jsou vektorové podprostory  $\mathcal{V}$  a  $\mathcal{W}$  v tomto pořadí)

1.  $\ker \varphi$  je vektorový podprostor  $\mathcal{V}$ , kde  $\mathcal{V}$  je z definice 46.
2.  $\operatorname{im} \varphi$  je vektorový podprostor  $\mathcal{W}$ , kde  $\mathcal{W}$  je z definice 46.

Důkaz.

1.  $\vec{u}, \vec{v} \in \ker \varphi : \varphi(\vec{u}) = \vec{0}, \varphi(\vec{v}) = \vec{0}$   
 $\varphi(\vec{u} + \vec{v}) = \varphi(\vec{u}) + \varphi(\vec{v})^{19} = \vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$
2.  $\vec{u} \in \ker \varphi$   
 $\varphi(k \cdot \vec{u}) = k \cdot \varphi(\vec{u})^{20} = k \cdot \vec{0} = \vec{0}$

Ukázali jsme, že  $\ker \varphi$  splňuje všechny podmínky k tomu, aby byl vektorový podprostor  $\mathcal{V}$ .

Podobným způsobem bychom ukázali i druhou část věty o  $\operatorname{im} \varphi$  a došli také ke kladnému závěru.  $\square$

**Definice 48** (Monomorfismus)

Jestliže je homomorfismus injektivní, nazýváme ho monomorfismus.

**Definice 49** (Epimorfismus)

Jestliže je homomorfismus surjektivní, nazýváme ho epimorfismus.

<sup>19</sup>Vychází z vlastností homomorfismu.

<sup>20</sup>Z definice homomorfismu



**Definice 50 (Izomorfismus)**

Jestliže je homomorfismus bijektivní, nazýváme ho izomorfismus.

**Definice 51 (Endomorfismus)**

Jestliže má homomorfismus  $\varphi$  výchozí i cílovou množinu totožnou, tedy:

$$\varphi : V \rightarrow V$$

nazveme ho endomorfismus.

Intuitivně můžeme říct, že se jedná o homomorfismus do sebe sama.

**Definice 52 (Automorfismus)**

Homomorfismu, který je endomorfismem a současně izomorfismem nazveme automorfismus.

**Věta 6**

$$\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W} \text{ je epimorfismus} \Leftrightarrow \text{im } \varphi = \mathcal{W}$$

**Věta 7**

$$\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W} \text{ je monomorfismem} \Leftrightarrow \ker \varphi = \{\vec{0}\}$$

Důkaz. Dokažme, že  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$  není monomorfismem  $\Leftrightarrow \ker \varphi \neq \{\vec{0}\}$

Důkaz pro  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$  není monomorfismem  $\Rightarrow \ker \varphi \neq \{\vec{0}\}$ :

Předpokládejme, že  $\varphi$  není monomorfismus, to znamená, že  $\varphi$  není inektivní.

To, že  $\varphi$  není inektivní znamená, že existují nějaké vektory  $\vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{V}$ , pro které:

$$\vec{u} \neq \vec{v}, \varphi(\vec{u}) = \varphi(\vec{v})$$

potom

$$\varphi(\vec{u} - \vec{v}) = {}^{21}\varphi(\vec{u}) - \varphi(\vec{v}) = \vec{0}$$

Ovšem  $\vec{u}$  je různé od  $\vec{v}$  a tedy:

$$\vec{u} - \vec{v} \in \ker \varphi$$

A  $\vec{u} - \vec{v}$  je nulový vektor, takže jádro je netriviální.

Důkaz pro  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$  není monomorfismem  $\Leftarrow \ker \varphi \neq \{\vec{0}\}$ :

Předpokládejme, že  $\text{im } \varphi$  je netriviální a ukážeme, že pak zobrazení nemůže být homomorfismem.

---

<sup>21</sup>Tato rovnost vychází z definice homomorfismu.

Z předpokladu netriviálního jádra:

$$\exists \vec{v} \neq \vec{0}, \vec{v} \in \mathcal{V} \text{ tak, že } \varphi(\vec{v}) = \vec{0}$$

$$\vec{u} \in \mathcal{V} \quad \varphi(\vec{u}) = \vec{w} \in \mathcal{W}$$

$$\varphi(\vec{u} + \vec{v}) = \varphi(\vec{u}) + \varphi(\vec{v}) = \vec{w} + \vec{0} = \vec{w}$$

□

## 4.2 Matice

### Definice 53 (Stopa)

Stopa je definována pro čtvercové matice. Jedná se o zobrazení, které čtvercové matici přiřadí jedno číslo. Stopu budeme značit  $tr$ <sup>22</sup>

$$tr : Mat_n(F) \rightarrow F$$

$$tr(A) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$$

Vlastnosti:

- $tr(A^T) = tr(A)$
- $tr(A + B) = tr(A) + tr(B)$
- $tr(k \cdot A) = k \cdot tr(A)$
- $tr(A \cdot B) = tr(B \cdot A)$ <sup>23</sup>

Důkaz. ( $tr(A \cdot B) = tr(B \cdot A)$ )

$$C = AB, D = BA$$

$$tr(AB) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{ki}$$

$$tr(BA) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n b_{ik} \cdot a_{ki} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ki} \cdot b_{ik} = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ik} \cdot b_{ki} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{ki}$$

□

<sup>22</sup>Z anglického trace.

<sup>23</sup>Zajímavé však je, že  $tr(ABC) \neq tr(ACB)$

**Definice 54** (Determinant)

Determinant budeme definovat pro čtvercové matice. Opět se jedná o zobrazení, které čtvercové matici přiřadí jedno číslo. Determinant matice  $A$  budeme značit  $\det A$ , nebo také  $|A|$ .

$$\det : \text{Mat}_n(F) \rightarrow F$$

$$\det A = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) \cdot a_{1\sigma(1)} \cdot a_{2\sigma(2)} \cdot \dots \cdot a_{n\sigma(n)}$$

Při výpočtu podle vzorce je vhodné postupovat tak, že u řádkových indexů, začneme od jedničky a postupně zvyšujeme řádkový index a u sloupcových indexů uvažujeme všechny možné permutace  $n$  prvkové množiny těchto sloupcových indexů, tím nám vznikne nějaká permutace, která je buďto sudá, nebo lichá a danému součinu přiřadíme znaménko permutace.

**Příklad** (Výpočet determinantu pro matice řádu 1)

$$n = 1 : S_1 = \{1\}$$

$$\det A = a_{11}$$

**Příklad** (Výpočet determinantu pro matice řádu 2)

$$n = 2 : S_2 = \{(1, 2), (2, 1)\}$$

$$\det A = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}$$

**Příklad** (Výpočet determinantu pro matice řádu 3)

$$n = 3 : S_3 = \{(1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2), (3, 2, 1)\}$$

$$\det A = a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} + a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31} + a_{13} \cdot a_{21} \cdot a_{32} - a_{11} \cdot a_{23} \cdot a_{32} - a_{12} \cdot a_{21} \cdot a_{33} - a_{13} \cdot a_{22} \cdot a_{31}$$

**Definice 55** (Schodovitá matice)

Je horní trojúhelníková matice, ve které můžeme nulovou část oddělit "schody", které mají výšku stupně 1.

## 5 Pátá přednáška

### 5.1 Metody pro výpočet determinantu

Vzorec pro obecný výpočet determinantu 54 vyžaduje všechny permutace řádkových indexů, pro matici řádu  $n$  je takových permutací  $n!$  a jejich počet tak roste velmi rychle s řádem matice. Je proto komplikované tímto způsobem spočítat determinanty větších matic.

Dost často se v praxi vyskytují matice, které jsou nějakým způsobem speciální a to hlavně tím, že buďto obsahují řádek, případně sloupec s hodně nulami, nebo nějakou jednoduchou úpravou můžeme takový řádek s hodně nulami do matice dostat. V takovém případě je možné použít následující metody a výpočet determinantu zefektivnit.

Pokud však takový řádek/sloupec s hodně nulami v matici neexistuje, nebo je jich tam velice málo, aplikováním těchto metod si příliš nepomůžeme a stále se bude jednat o problém s časovou náročností  $n!$ .

#### 5.1.1 Laplaceova metoda

Laplaceova metoda rozvoje podle vybraného řádku, nebo podle vybraného sloupce. Vybereme řádek/sloupec podle kterého chceme rozvoj udělat, index tohoto řádku/sloupce označme jako  $i$  a následně pomocí tohoto řádku výpočet determinantu matice řádu  $n$  rozložit na součet  $n$  determinantů matice řádu  $n - 1$  vynásobené hodnotami z řádku/sloupce, podle kterého jsme rozvoj vytvářeli.

$$|A| = (-1)^{i+1} \cdot a_{i1} \cdot M_{i1} + (-1)^{i+2} \cdot a_{i2} \cdot M_{i2} + \dots + (-1)^{i+n} \cdot a_{in} \cdot M_{in}$$
$$|A| = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} \cdot a_{ij} \cdot M_{ij}$$

Kde  $M_{ij}$  představuje minor vzniklý vynecháním  $i$ -tého řádku a  $j$ -tého sloupce.

Mějme matici řádu 3:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

Vyberme pro aplikaci Laplaceova rozvoje první řádek a zamysleme se, v jakých všech součinech bude figurovat jeho první člen  $a_{11}$ :

$$M_{a_{11}} = a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} - a_{11} \cdot a_{23} \cdot a_{32}$$

Když z  $M_{a_{11}}$  vytkneme  $a_{11}$ , dostáváme:

$$M_{a_{11}} = a_{11} \cdot (a_{22} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{32}) = a_{11} \cdot \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Totéž pro  $a_{12}$ :

$$M_{a_{12}} = a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31} - a_{12} \cdot a_{21} \cdot a_{33}$$

$$M_{a_{12}} = a_{12} \cdot (a_{23} \cdot a_{31} - a_{21} \cdot a_{33}) = -a_{12} \cdot \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix}$$

Proto:

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

Znaménka u jednotlivých prvků plynou ze znamének permutací ve výpočtu determinantu, můžeme však použít pomůcku, která říká, že pokud součet indexů prvků pro který počítáme minor bude sudý, bude mít znaménko + a pokud bude součet lichý, bude mít znaménko –.

Postup, který byl naznačen na matici řádu 3 funguje obecně pro libovolné matice řádu  $n$ .

**Příklad** (Výpočet determinantu pomocí Laplaceova rozvoje)

$$d = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 5 & -1 & 0 \\ 3 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & -2 & 4 & 9 \end{vmatrix}$$

$$d = 1 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 & 5 & -1 \\ 3 & 2 & 4 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 5 \\ 2 & 0 & -2 & 4 \end{vmatrix} + 9 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 & 5 & -1 \\ 3 & 2 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & -2 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 5 \end{vmatrix}$$

$$d = -3 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 & -1 \\ 2 & 0 & 5 \\ 0 & -2 & 4 \end{vmatrix} + 2 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 5 & -1 \\ 3 & 0 & 5 \\ 2 & -2 & 4 \end{vmatrix} - 4 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 3 & 2 & 5 \\ 2 & 0 & 4 \end{vmatrix} + 9 \cdot \left( -3 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 5 & -1 \\ 0 & -2 & 1 \\ 2 & 0 & 5 \end{vmatrix} + 2 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 5 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 3 & 0 & 5 \end{vmatrix} - 4 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 5 \end{vmatrix} \right)$$

S použitím této metody je možné také vybrat více řádků/sloupců současně, což v některých případech

může být výhodné.

Mějme matici  $A$  řádu  $n$  a indexy

$$i, j = 1, \dots, n$$

Potom vybereme řádky

$$i_1 \dots i_q, 1 \leq q \leq n$$

Potom:

$$\det(A) = (-1)^{i_1 + \dots + i_q + 1 + \dots + q} A_{i_1, \dots, i_q; 1, \dots, q} M_{i_1, \dots, i_q; 1, \dots, q} + \dots + (-1)^{i_1, \dots, i_q; n-q+1, \dots, n} \cdot A_{i_1, \dots, i_q; n-q+1, \dots, n} M_{i_1, \dots, i_q; n-q+1, \dots, n}$$

**Příklad** (Laplaceova metoda s výběrem více řádků/sloupců)

$$d = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 7 \\ 3 & 1 & 5 & 2 & -2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 5 & 2 & 3 & -8 \end{vmatrix}$$

$$d = (-1)^{2+4+1+2} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 5 \\ 5 & 2 & -2 \\ 2 & 3 & -8 \end{vmatrix} \dots$$

Takových členů bude obecně  $\binom{n}{q}$ , kde  $q$  označuje počet vybraných řádků/sloupců v tomto případě tedy  $\binom{5}{2}$ . Díky vhodně vybraným řádkům pro vytvoření rozvoje však velká část těchto členů bude ve výsledku nulová a ty můžeme tedy stejně jako v předchozím příkladu rovnou vynechat a psát pouze ty nenulové a stejně tak můžeme rovnou vyjádřit hodnotu subdeterminantu, pokud je zřejmá.

$$d = -2 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 2 & -2 \\ 5 & 3 & -8 \end{vmatrix} - 7 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 5 & 2 \\ 5 & 2 & 3 \end{vmatrix}$$

## 5.2 Inverzní matice

**Definice 56** (Algebraický doplněk)

Algebraický doplněk prvku  $a_{ij}$  je  $(-1)^{i+j} \cdot M_{ij}$ .

**Definice 57** (Adjungovaná matice)

Adjungovaná matice  $A^*$  vznikne z matice  $A$  tak, že každý prvek nahradíme jeho algebraickým doplněkem.

**Definice 58** (Inverzní matice)

Inverzní matice, je matice k dané matici  $A$ , která splňuje:

$$A \cdot A^{-1} = E = A^{-1} \cdot A$$

Inverzní matici můžeme spočítat jako:

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot (A^*)^T$$

Z Cauchyho věty o součinu 9 vyplývá, že determinant  $A$  musí být nenulový<sup>24</sup>.

**Příklad** (Výpočet inverzní matice)

Spočítejte inverzní matici  $A^{-1}$  k matici  $A$ :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & -1 & 3 \\ 3 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

Prvním krokem je zjistit, zda je  $A$  vůbec regulární matice, tedy spočítat determinant  $A$ .

$$|A| = 1 \cdot (-1) \cdot 4 + 3 \cdot 2 \cdot 3 - (4 \cdot 2 \cdot 2) = -2$$

Následně potřebujeme vyjádřit adjungovanou matici  $A^*$

$$A^* = \begin{pmatrix} \begin{vmatrix} -1 & 3 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} \\ -\begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 0 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ -1 & 3 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 3 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -1 \end{vmatrix} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 & 1 & 3 \\ -8 & 4 & 6 \\ 6 & -3 & -5 \end{pmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot A^{*T} = \frac{1}{-2} \cdot \begin{pmatrix} -4 & -8 & 6 \\ 1 & 4 & -3 \\ 3 & 6 & -5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 4 & -3 \\ \frac{-1}{2} & -2 & \frac{3}{2} \\ \frac{-3}{2} & -3 & \frac{5}{2} \end{pmatrix}$$

Pro ověření:

$$A \cdot A^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

---

<sup>24</sup>Matice s nenulovým determinantem nazýváme regulární, a naopak matice s nulovým determinantem nazýváme singulární.

Pro každou regulární matici jsme schopni tímto způsobem najít matici inverzní. Vezmeme-li množinu regulárních matic řádu  $n$  a operaci násobení matic, zjistíme, že toto násobení je asociativní, ke každé matici existuje matice inverzní a vzhledem k násobení máme i neutrální prvek, kterým je jednotková matice. Regulární matice nad polem  $F$  řádu  $n$  s operací násobení matic tvoří grupu! Tuto grupu značíme jako:

$$GL(n, F)$$

**Příklad** (Počet prvků grupy  $GL$  nad konečným polem)

*Kolik prvků má  $GL(n, \mathbb{F}_{2^k})$ ?*

**Příklad** (Nad polem  $F_7$  řešte maticovou rovnici)

$$X \cdot A = B$$

*Pro neznámou matici  $X$  a*

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 5 & 6 \end{pmatrix}$$

*Je nutné pamatovat na to, že násobení matic není komutativní a správně vynásobit obě strany korektně inverzní maticí.*

$$X \cdot A = B$$

$$X \cdot A \cdot A^{-1} = B \cdot A^{-1}$$

$$X = B \cdot A^{-1}$$

*Vyjádříme inverzní matici  $A^{-1}$ :*

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \cdot A^{*T} = \frac{1}{1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 2 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}$$

*A dosadíme do dříve získaného vztahu:*

$$X = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 5 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} 3 & 5 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$$



### 5.3 Hodnost matice

Z definice 43 víme co je lineární nezávislost vektorů. V každé matici můžeme řádky (případně sloupce) uvažovat jako vektory. Může nás zajímat, kolik je v matici lineárně nezávislých řádků (případně sloupců).

Počet lineárně nezávislých řádků se nazývá hodnost matice. Hodnost matice je tedy počet jejích lineárně nezávislých řádků, což je totéž jako počet lineárně nezávislých sloupců. Hodnost matice  $A$  značíme:

$$h(A)$$

Nejmenší hodnost matice může být 0, hodnost 0 má pouze nulová matice, protože nulový vektor není nezávislý ani sám o sobě. A maximální možná hodnost pro matici o rozměrech  $m \times n$  je  $\min(m, n)$ .

$$0 \leq h(A) \leq \min(m, n)$$

#### 5.3.1 Výpočet hodnosti matice

Pro jednotlivé řádky by bylo možné využít vztahu z definice 43, pomocí něj sestavit soustavu lineárních rovnic a vypočítat její řešení. To však může být zbytečně zdlouhavé, budeme tedy používat tzv. ekvivalentní (elementární) úpravy matice, které nemění hodnost matice.

Ekvivalentními úpravami matice jsou:

1. Přičtení  $k$ -násobku řádku  $k$  jinému řádku.
2. Vynásobení řádku nějakým nenulovým číslem  $l$ .
3. Výměna řádků<sup>25</sup>.

Pomocí těchto ekvivalentních úprav upravíme matici na schodovitou. A hodnost schodovité matice je velice snadné spočítat, protože u schodovité matice je její hodnost počet nenulových řádků (vektorů).

Maximální hodnost matice označujeme jako plnou hodnost.

**Příklad** (Výpočet hodnosti matice)

---

<sup>25</sup>Výměna řádků jde realizovat pomocí prvních dvou úprav, její uvádění zde tedy není nutné.

Vypočtěte hodnotu matice  $Q$ .

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 5 \\ 2 & -1 & 2 & -3 \\ 2 & 1 & -3 & 6 \\ 6 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Pomocí elementárních úprav převedeme matici  $Q$  do schodovitého tvaru.

$$Q \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & -5 & 2 & -13 \\ 0 & -3 & -3 & -4 \\ 0 & -13 & 1 & -30 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & -5 & 2 & -13 \\ 0 & 15 & 15 & 20 \\ 0 & 65 & -5 & 150 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & -5 & 2 & -13 \\ 0 & 0 & 21 & -19 \\ 0 & 0 & 21 & -19 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & -5 & 2 & -13 \\ 0 & 0 & 21 & -19 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = R$$

Z upravené matice vidíme, že:

$$h(R) = 3 = h(Q)$$

## 5.4 Výpočet determinantu pomocí ekvivalentních úprav

S využitím ekvivalentních úprav 5.3.1 můžeme matici převést na schodovitý tvar a jednoduše spočítat determinant schodovité matice jako součin prvků na hlavní diagonále.

Při aplikaci úprav však musíme dávat pozor na to, jakým způsobem která úprava mění determinant upravené matice:

1. Přičtení  $k$ -násobku řádku k jinému řádku. Determinant se nemění.
2. Vynásobení řádku nějakým nenulovým číslem  $l$ . Determinant bude  $l$  krát větší.
3. Výměna řádků. Změní se znaménko determinantu.

Vliv těchto úprav na determinant je lehké ukázat na matici řádu 2. Platí však obecně pro jakoukoliv matici řádu  $n$ .

Z těchto pravidel lze také vyvodit, že každá čtvercová matice řádu  $n$  s plnou hodnotou je regulární a s jakoukoliv menší než plnou hodnotou je singulární.

**Příklad** (Výpočet determinantu pomocí ekvivalentních úprav)

Pomocí ekvivalentních úprav spočtěte determinant matice  $M$ .

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 6 & 2 \\ 0 & 0 & 5 & 6 \\ 0 & 1 & 10 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 \cdot \frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 5 & 6 \\ 0 & 1 & 10 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 - r_1} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 5 & 6 \\ 0 & 1 & 10 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 \leftrightarrow r_4} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 10 & 1 \\ 0 & 0 & 5 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} = N$$

$$\det(N) = -15$$

$$\det(N) = \frac{1}{2} \cdot -1 \cdot \det(M)$$

$$\det(M) = -2 \cdot \det(N) = 30$$

**Definice 59** (Symetrická matice)

Matice  $A$  je symetrická, pokud platí:

$$A^T = A$$

Pro jednotlivé prvky matice musí tedy platit:

$$a_{ij} = a_{ji}$$

Symetrickou matici značíme s dolním indexem *sym*, např.  $A_{\text{sym}}$

**Definice 60** (Antisymetrická matice)

Matice  $A$  je antisymetrická, pokud platí:

$$A^T = -A$$

Pro jednotlivé prvky matice musí tedy platit:

$$a_{ij} = -a_{ji}$$

Antisymetrickou matici značíme s dolním indexem *alt*, např.  $A_{\text{alt}}$

**Věta 8** (Rozklad čtvercové matice na symetrickou a antisymetrickou matici)

Každou čtvercovou matici lze rozložit na součet matice symetrické a antisymetrické.

$$A = A_{\text{sym}} + A_{\text{alt}}$$

Důkaz. Matice  $A_{\text{sym}}$  a  $A_{\text{alt}}$  můžeme vždy zkonstruovat následovně:

$$A_{\text{sym}} = \frac{1}{2} \cdot (A + A^T)$$

Takto zvolená matice  $A_{sym}$  je určitě symetrická, protože:

$$(A_{sym})^T = \frac{1}{2}(A^T + (A^T)^T) = A_{sym}$$

Podobně pro  $A_{alt}$ :

$$A_{alt} = \frac{1}{2} \cdot (A - A^T)$$

Takto zvolená matice  $A_{alt}$  je určitě antisymetrická, protože:

$$(A_{alt})^T = \frac{1}{2} \cdot (A^T - (A^T)^T) = -A_{alt}$$

Zároveň vidíme, že výsledkem součtu těchto dvou matic je opravdu původní matice:

$$A_{sym} + A_{alt} = \frac{1}{2} \cdot (A + A^T) + \frac{1}{2} \cdot (A - A^T) = A$$

□

## 5.5 Soustavy lineárních rovnic

Soustavy lineárních rovnic můžeme řešit elementárně (vyjadřovat neznámé a dosazovat do ostatních rovnic, případně sečíst dvě rovnice a tím nějakou neznámou eliminovat). Tento způsob však má nevýhodu, že není algoritmický.

Proto budeme používat postupy pomocí matic, které jsou jednoduše algoritmizovatelné.

Soustava lineárních rovnic obecně:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_1 + \dots + a_{1n} \cdot x_n &= b_1 \\ &\vdots \\ a_{m1} \cdot x_1 + \dots + a_{mn} \cdot x_n &= b_m \end{aligned}$$

Proměnným  $a_{ij}$  říkáme koeficienty, které tvoří obdélníkovou matici o  $m$  řádcích a  $n$  sloupcích. Proměnné  $x_1, \dots, x_n$  nazýváme neznámé, ty budeme počítat. A proměnné  $b_1, \dots, b_m$  nazýváme absolutní členy. Tuto obecnou soustavu lineárních rovnic můžeme zapsat maticově:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Někdy také zapisujeme jako:

$$A \cdot \vec{x} = \vec{b}$$

V případě, že je vektor absolutních členů  $\vec{b}$  nulový vektor, tedy:

$$\vec{b} = \vec{o}$$

Nazýváme takovou soustavu homogenní. Homogenní soustava lineárních rovnic je vždy řešitelná. Obecně řešení homogenní soustavy lineárních rovnic tvoří vektorový podprostor.

A v případě nehomogenních soustav se nejedná o vektorový podprostor, ale o affinní podprostor.

### 5.5.1 Gaussova eliminační metoda

Matici soustavy<sup>26</sup>  $A$  a vektor absolutních členů  $\vec{b}$  zapíšeme do jedné rozšířené matice následovně:

$$\left( A \mid \vec{b} \right) = \left( \begin{array}{ccc|c} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right)$$

Tuto rozšířenou matici poté pomocí elementárních úprav upravujeme do vhodného (schodovitého) tvaru, ze kterého dokážeme lehce zjistit řešení celé soustavy. Ze schodovité matice pak jednoduše dostaneme řešení celé soustavy "zpětným chodem" od posledního řádku, kdy postupně zjišťujeme hodnoty neznámých.

Soustava rovnice je řešitelná právě tehdy, když:

$$h(A) = h\left(\left( A \mid \vec{b} \right)\right)$$

V opačném případě matice řešitelná není.

V případě, že se hodnoty rovnají, a soustava je tedy řešitelná, mohou nastat dva případy:

1.  $h(A) = n$ , kde  $n$  je počet neznámých

Rovnice má právě jedno řešení.

2.  $h(A) = k < n$

Rovnice má nekonečně mnoho řešení<sup>27</sup>.

Mohou tedy nastat pouze 3 případy:

<sup>26</sup>Tuto matici tvoří jednotlivé koeficienty.

<sup>27</sup>A tato řešení jsou závislá na  $n - k$  libovolných parametrech. V případě, že navíc pracujeme nad konečným polem, není jich tedy nekonečně mnoho

1. Soustava není řešitelná.
2. Soustava je řešitelná a má právě jedno řešení.
3. Soustava je řešitelná a má nekonečně mnoho řešení.

**Příklad** (Příklad neřešitelné soustavy)

*Řešte následující soustavu rovnic:*

$$\begin{aligned}x + y + z &= 2 \\2x - y + 2z &= 1 \\7x + 4y + 7z &= -3\end{aligned}$$

*Tuto soustavu přepíšeme do matice a upravíme do schodovitého tvaru:*

$$\left(\begin{array}{ccc|c}1 & 1 & 1 & 2 \\2 & -1 & 2 & 1 \\7 & 4 & 7 & -3\end{array}\right) \xrightarrow{r_2-2\cdot r_1, r_3-7\cdot r_1} \left(\begin{array}{ccc|c}1 & 1 & 1 & 2 \\0 & -3 & 0 & -3 \\0 & -3 & 0 & -17\end{array}\right) \xrightarrow{r_3-r_2} \left(\begin{array}{ccc|c}1 & 1 & 1 & 2 \\0 & -3 & 0 & -3 \\0 & 0 & 0 & -14\end{array}\right)$$

*Hodnost základní matice je v tomto případě zjevně 2 a hodnost celé rozšířené matice je zjevně 3. Hodnosti se nerovnají a soustava tedy nemá řešení.*

## 6 Šestá přednáška

### 6.1 Matice

**Věta 9** (Cauchyho věta o součinu)

*Determinant součinu je součin determinantů.*

$$|A \cdot B| = |A| \cdot |B|$$

*Důkaz.* Idea důkazu: Uvažujme matici  $H$  v tomto tvaru:

$$H = \begin{pmatrix} A & O \\ \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1 \end{pmatrix} & B \end{pmatrix}$$

Jestliže matice  $A$  a  $B$  jsou řádu  $n$ , potom matice  $H$  je řádu  $2 \cdot n$ . Nyní zkonstruujeme matici  $K$ :

$$K = \begin{pmatrix} A & C \\ \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1 \end{pmatrix} & O \end{pmatrix}$$

S tím, že:

$$C = A \cdot B$$

Zřejmě:

$$|H| = |A| \cdot |B|$$

$$|K| = |C|$$

A  $K$  lze obdržet vhodnými elementárními úpravami z  $H$ . □

### 6.2 Soustavy lineárních rovnic

Příklady na řešitelnost soustavy. Příklad na soustavu, která nemá řešení je na konci předchozí přednášky.

**Příklad** (Řešení soustavy lineárních rovnic s právě jedním řešením)

*Řešte následující soustavu lineárních rovnic:*

$$2x + y - z = 43$$

$$3x + 3y + 5z = 84$$

$$4x - y - 2z = 86$$

Soustavu přepíšeme do rozšířené matice a elementárními úpravami převedeme do schodovitého tvaru:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ 3 & 3 & 5 & 84 \\ 4 & -1 & -2 & 86 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 \cdot (-2); r_3 \cdot (-1)} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ -6 & -6 & -10 & -168 \\ -4 & 1 & 2 & 86 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 + 3 \cdot r_1; r_3 + 2 \cdot r_1} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ 0 & -3 & -13 & -39 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 + r_3; r_3 \cdot \frac{1}{3}; r_3 \leftrightarrow r_2} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13 & -39 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 + r_3; r_3 \cdot \frac{-1}{3}; r_3 \leftrightarrow r_2} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13 & -39 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_3 \cdot \frac{-1}{13}} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 & 43 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Hodnost základní matice je 3, hodnost rozšířené matice je také 3, soustava má tedy právě jedno řešení. Nyní provedeme „zpětný chod“ a ze schodovitého tvaru matice vyjádříme odspodu hodnoty jednotlivých proměnných.

$$z = 3$$

$$y = 0$$

$$2x + y - z = 43$$

$$2x + 0 - 3 = 43$$

$$2x = 46$$

$$x = 23$$

**Příklad** (Řešení soustavy lineárních rovnic s nekonečným počtem řešení)

Řešte následující soustavu lineárních rovnic v  $\mathbb{R}$ :

$$2a - b + c - 4d = -2$$

$$4a + 2b - c + 5d = 1$$

$$10a - b + 2c - 7d = -5$$

$$30a + 9b - 3c + 18d = 0$$



Soustavu přepíšeme do rozšířené matice a elementárními úpravami převedeme do schodovitého tvaru:

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 & -4 & -2 \\ 4 & 2 & -1 & 5 & 1 \\ 10 & -1 & 2 & -7 & -5 \\ 30 & 9 & -3 & 18 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 \cdot (-1); \widetilde{r_3} \cdot -1; r_4 \cdot \frac{-1}{3}} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 & -4 & -2 \\ -4 & -2 & 1 & -5 & -1 \\ -10 & 1 & -2 & 7 & 5 \\ -10 & -3 & 1 & -6 & 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_2 + 2 \cdot r_1; \widetilde{r_3} + 5 \cdot r_1; r_4 + 5 \cdot r_1} \\
 \xrightarrow{r_2 + 2 \cdot r_1; \widetilde{r_3} + 5 \cdot r_1; r_4 + 5 \cdot r_1} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 & -4 & -2 \\ 0 & -4 & 3 & -13 & -5 \\ 0 & -4 & 3 & -13 & -5 \\ 0 & -8 & 6 & -26 & -10 \end{pmatrix} \xrightarrow{r_3 - r_2; \widetilde{r_4} - 2 \cdot r_2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 1 & -4 & -2 \\ 0 & -4 & 3 & -13 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Vidíme, že hodnost základní matice soustavy je 2 a hodnost rozšířené matice soustavy je také 2 hodnosti se rovnají a soustava je tedy řešitelná. Máme ovšem 4 neznámé a hodnosti jsou rovny dvěma, řešení lze tedy vyjádřit pomocí  $4 - 2 = 2$  parametrů.

Za neznámé  $c, d$  dosadíme parametry  $p, q$  a pomocí těchto parametrů opět zpětným chodem vyjádříme ostatní neznámé.

$$d = q$$

$$c = p$$

$$p, q \in \mathbb{R}$$

$$-4b + 3c - 13d = -5$$

$$-4b + 3p - 13q = -5$$

$$-4b = -3p + 13q - 5$$

$$b = \frac{3p - 13q + 5}{4}$$

$$2a - b + c - 4d = -2$$

$$2a - \frac{3p - 13q + 5}{4} + p - 4q = -2$$

$$2a = \frac{3p - 13q + 5}{4} + \frac{-4p + 16q - 8}{4}$$

$$2a = \frac{-p + 3q - 3}{4}$$

$$a = \frac{-p + 3q - 3}{8}$$

Jako parametry ovšem nebylo nutné zvolit zrovna neznámé  $c, d$ . Jako parametr jsme mohli vzít například  $a$ , nebo  $b$ , nebo také výraz  $a + 2b$ . Můžeme si je zkrátka zvolit dle potřeby a parametrické vyjádření tedy není jednoznačné. Ne vždy je navíc možné parametry volit takto vhodně „odzadu“, jak jsme to udělali v tomto příkladu.

**Příklad** (Případ, kdy nejde neznámé parametrizovat odzadu)

Mějme rozšířenou matici soustavy upravenou na schodovitý tvar:

$$\left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

V tomto případě si pro parametrizaci nemůžeme jednoduše zvolit poslední neznámou, protože ta má přesně danou hodnotu 5, k parametrizaci tak musíme využít jiný vhodný postup.

**Příklad** (Vytvoření soustavy rovnic dle požadavků)

Vytvořte soustavu tří různých lineárních rovnic o dvou neznámých, která má nekonečně mnoho řešení.

$$x = 0$$

$$2y = 0$$

$$3y = 0$$

### 6.3 Výpočet inverzní matice pomocí Gaussovy metody

Gaussovu metodu můžeme použít i k výpočtu inverzní matice. Pro výpočet inverzní matice k matici  $A$  stačí vytvořit rozšířenou matici:

$$\left( A \mid E \right)$$

Kde matice  $E$  představuje jednotkovou matici. A pomocí elementárních úprav tuto rozšířenou matici upravit do tvaru, kdy jednotkovou matici dostaneme na levé straně, inverzní matice pak bude na pravé straně:

$$\left( E \mid A^{-1} \right)$$

Tato úprava je realizovatelná v případě, že je matice  $A$  regulární a existuje k ní tedy inverzní matice.

**Příklad** (Výpočet inverzní matice Gaussovou metodou)

Gaussovou metodou spočítejte inverzní matici  $A^{-1}$  k matici  $A$ .

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix}$$

Matici přepíšeme do rozšířené matice s jednotkovou maticí na pravé straně a levou stranu pomocí elementárních úprav převedeme na matici jednotkovou.

$$\begin{aligned} & \left( \begin{array}{ccc|ccc} 2 & 3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 5 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow{r_1 \leftrightarrow r_2, r_3 \cdot (-1)} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -5 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right) \xrightarrow{r_2 - 2 \cdot r_1, r_3 + r_1} \\ & \xrightarrow{r_2 - 2 \cdot r_1, r_3 + r_1} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 2 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & -1 & -6 & 0 & 1 & -1 \end{array} \right) \xrightarrow{r_2 + 3 \cdot r_3, r_2 \leftrightarrow r_3} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -6 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 3 & 2 & 1 & -2 & 0 \end{array} \right) \xrightarrow{r_3 \cdot \frac{1}{16}} \\ & \xrightarrow{r_3 \cdot \frac{1}{16}} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -6 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-1}{16} & \frac{-1}{16} & \frac{3}{16} \end{array} \right) \xrightarrow{r_2 + 6 \cdot r_3, r_1 - r_3} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{16} & \frac{15}{16} & \frac{3}{16} \\ 0 & -1 & 0 & \frac{-6}{16} & \frac{10}{16} & \frac{2}{16} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-1}{16} & \frac{-1}{16} & \frac{3}{16} \end{array} \right) \xrightarrow{r_2 \cdot (-1)} \\ & \xrightarrow{r_2 \cdot (-1)} \left( \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & \frac{-1}{16} & \frac{15}{16} & \frac{3}{16} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{6}{16} & \frac{-10}{16} & \frac{-2}{16} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{-1}{16} & \frac{-1}{16} & \frac{3}{16} \end{array} \right) \end{aligned}$$

## 6.4 Cramerovo pravidlo

Cramerovo pravidlo je k řešení soustav lineárních rovnic, kde základní matice soustavy je čtvercová regulární matice.

Cramerovo pravidlo říká, že  $i$ -tou neznámou  $x_i$  z matice soustavy  $A$  můžeme vyjádřit jako:

$$x_i = \frac{|A_i|}{|A|}$$

Kde  $A_i$  je matice vytvořená z matice  $A$  tak, že  $i$ -tý sloupec nahradíme sloupcem absolutních členů soustavy.

Tuto metodu je výhodné použít když nepotřebujeme všechny neznámé, nebo když máme „nepěkné“ koeficienty.

**Příklad** (Výpočet neznámé pomocí cramerova pravidla)

Pomocí Cramerova pravidla vyjádřete neznámou  $y$  z následující soustavy rovnic:

$$\sqrt{2}x + y + z = 2\sqrt{2}$$

$$3x - \sqrt{2}z = 1$$

$$4y + 3 \cdot \sqrt{2}z = 1 + \sqrt{2}$$

Spočítáme potřebné determinanty

$$|A| = \begin{vmatrix} \sqrt{2} & 1 & 1 \\ 3 & 0 & -\sqrt{2} \\ 0 & 4 & 3 \cdot \sqrt{2} \end{vmatrix} = 12 - (-4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} + 9 \cdot \sqrt{2}) = 20 - 9 \cdot \sqrt{2}$$

$$|A_2| = \begin{vmatrix} \sqrt{2} & 2 \cdot \sqrt{2} & 1 \\ 3 & 1 & -\sqrt{2} \\ 0 & 1 + \sqrt{2} & 3 \cdot \sqrt{2} \end{vmatrix} = 9 + 3 \cdot \sqrt{2} - [-2 - 2\sqrt{2} + 36] = -25 + 5\sqrt{2}$$

A pomocí nich vyjádříme neznámou  $y$ :

$$y = \frac{|A_2|}{|A|} = \frac{-25 + 5 \cdot \sqrt{2}}{20 - 9 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{20 + 9 \cdot \sqrt{2}}{20 + 9 \cdot \sqrt{2}} = \frac{-500 - 225\sqrt{2} + 100\sqrt{2} + 90}{238} = \frac{-410 - 125\sqrt{2}}{238}$$

**Definice 61** (Podobnost matic)

Řekneme, že matice  $B$  je podobná matici  $A$ , jestliže existuje regulární matice  $S$  tak, že:

$$B = S \cdot A \cdot S^{-1}$$

**Věta 10** (Relace podobnosti matic)

Relace „být podobná“ je ekvivalence.

*Důkaz.* Pro důkaz ekvivalence musíme dokázat, že se jedná o reflexivní, symetrickou a tranzitivní relaci:

Reflexivita:

$$A = S \cdot A \cdot S^{-1} \text{ pro } S = E, \forall A$$

Symetrie: Předpokládejme, že  $B$  je podobná  $A$ :

$$B = S \cdot A \cdot S^{-1}$$

Potom musíme ukázat, že existuje regulární matice  $T$  taková, že:

$$A = T \cdot B \cdot T^{-1}$$

Pro splnění tohoto požadavku však stačí vzít  $T = S^{-1}$

Tranzitivita: Předpokládejme, že  $B$  je podobná  $A$  a že  $C$  je podobná  $B$ .

$$B = SAS^{-1}$$

$$C = TBT^{-1}$$

A nyní chceme ukázat, že  $C$  je podobná  $A$ .

$$C = UAU^{-1}$$

$$C = TSAS^{-1}T^{-1}$$

Pro splnění tohoto požadavku stačí zvolit  $U = TS$

□

## 6.5 Charakteristický polynom, vlastní čísla a vlastní vektory matice

**Definice 62** (Charakteristický polynom)

*Charakteristický polynom čtvercové matice  $A$  je polynom:*

$$|A - \lambda E|$$

**Definice 63** (Charakteristická rovnice)

*Charakteristická rovnice čtvercové matice  $A$  je rovnice, kde charakteristický polynom položíme roven 0:*

$$|A - \lambda E| = 0$$

**Definice 64** (Vlastní hodnoty)

*Vlastní hodnoty čtvercové matice  $A$  jsou kořeny charakteristického polynomu této matice.*

**Příklad**

*Vyjádřete charakteristický polynom a vlastní hodnoty matice  $A$ .*

$$A = \begin{pmatrix} 5 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
|A - \lambda E| &= 0 \\
\det\left(\begin{pmatrix} 5 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\right) &= 0 \\
\det\left(\begin{pmatrix} 5 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}\right) &= 0 \\
\begin{vmatrix} 5 - \lambda & 1 \\ -1 & -\lambda \end{vmatrix} &= 0 \\
-5 \cdot \lambda + \lambda^2 + 1 &= 0 \\
\lambda^2 - 5 \cdot \lambda + 1 &= 0 \\
\lambda_{1,2} &= \frac{5 \pm \sqrt{21}}{2}
\end{aligned}$$

**Definice 65** (Vlastní vektor matice A)

Vezmeme-li jednu konkrétní vlastní hodnotu  $\lambda_1$  matice A. Potom nenulový vektor  $\vec{u}$ , který splňuje:

$$(A - \lambda_1 \cdot E) \cdot \vec{u} = \vec{0}$$

Nazýváme vlastní vektor matice A odpovídající vlastní hodnotě  $\lambda_1$ . Tento vlastní vektor tvoří vektorový podprostor.

**Příklad** (Vlastní hodnoty a vlastní vektory)

Najděte všechny vlastní hodnoty a vlastní vektory matice A.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Vyjádříme vlastní čísla:

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} 1 - \lambda & 0 \\ 0 & 2 - \lambda \end{vmatrix} &= (1 - \lambda)(2 - \lambda) \\
\lambda_1 &= 1 \\
\lambda_2 &= 2
\end{aligned}$$

K vlastním číslům vyjádříme vlastní vektory: Pro  $\lambda_1$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$u_1 = p$$

$$u_2 = 0$$

Pro  $\lambda_2$  stejným postupem:

$$u_1 = 0$$

$$u_2 = p$$

A vlastní vektory matice  $A$  jsou tedy  $\begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}$  a  $\begin{pmatrix} 0 \\ p \end{pmatrix}$ , kde  $p \in \mathbb{R} \setminus 0$

**Věta 11** (Nezávislost vlastních vektorů)

Vlastní vektory příslušné různým vlastním hodnotám jsou lineárně nezávislé.

**Věta 12** (Vlastní hodnoty symetrické matice)

Vlastní hodnoty symetrické matice  $A$  jsou reálné ( $\in \mathbb{R}$ ).

**Věta 13** (Charakteristický polynom podobných matic)

Charakteristický polynom podobných matic je stejný a tedy mají i stejné vlastní hodnoty.

## 6.6 Matice homomorfismů

**Definice 66** (Matice homomorfismů)

Mějme vektorový prostor  $\mathcal{V}$  nad nějakým polem  $F$ , dimenze  $\mathcal{V}$  bude  $m$  a báze  $\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_m)$ . A vektorový prostor  $\mathcal{W}$  s dimenzí  $n$  a bází  $\bar{\mathcal{B}} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)$ .

Dále budeme mít zobrazení  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$ , které bude homomorfismus (lineární zobrazení) Označme:

$$\vec{w}_1 = \varphi(\vec{e}_1)$$

$$\vdots$$

$$\vec{w}_m = \varphi(\vec{e}_m)$$

Pak vektory  $\vec{w}_1, \dots, \vec{w}_m$  jsou lineárními kombinacemi bázevých vektorů v prostoru  $\mathcal{W}$ .

$$\begin{aligned}\vec{w}_1 &= a_{11} \cdot \vec{f}_1 + \dots a_{1n} \cdot \vec{f}_n \\ &\vdots \\ \vec{w}_m &= a_{m1} \cdot \vec{f}_1 + \dots a_{mn} \cdot \vec{f}_n\end{aligned}$$

Potom matici koeficientů  $a$ :

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Nazveme matice homomorfismu  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$  v bázích  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$ .

**Příklad** (Matice homomorfismu)

Nechť:

$$\begin{aligned}\mathcal{V} &= \mathbb{R}^3, \mathcal{B} = ((1, 1, 1), (1, 0, 1), (1, 0, 0)) \\ \mathcal{W} &= \mathbb{R}^2, \overline{\mathcal{B}} = ((2, 3), (3, 2)) \\ \varphi((\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3)) &= (0, \vec{v}_2 + 2 \cdot \vec{v}_3)\end{aligned}$$

Potom:

$$\begin{aligned}\vec{w}_1 &= (0, 3) = a_{11} \cdot (2, 3) + a_{12} \cdot (3, 2) \\ \vec{w}_2 &= (0, 2) = a_{21} \cdot (2, 3) + a_{22} \cdot (3, 2) \\ \vec{w}_3 &= (0, 0) = a_{31} \cdot (2, 3) + a_{32} \cdot (3, 2)\end{aligned}$$

Vyřešíme tyto 3 soustavy lineárních rovnic a tím dostaneme následující matici homomorfismů:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{6}{5} & \frac{-4}{5} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$



## 7 Sedmá přednáška

### 7.1 Matice homomorfismů a přechodů

**Příklad** (Výpočet matice homomorfismu)

Vyjádřete matici homomorfismu  $\varphi$  v bázích  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$ , kde:

$$\begin{aligned}\mathcal{V} &= \mathbb{R}^3, \mathcal{B} = (e_1 = (0, 0, 1), e_2 = (0, 1, 2), e_3 = (1, 2, 3)) \\ \mathcal{W} &= \mathbb{R}^4, \overline{\mathcal{B}} = (f_1 = (0, 0, 0, 1), f_2 = (0, 0, -1, 0), f_3 = (0, 1, 0, 0), f_4 = (-1, 0, 0, 0)) \\ \varphi : \mathcal{V} &\rightarrow \mathcal{W}, \varphi((v_1, v_2, v_3)) = (v_1 + v_2, v_2 + v_3, v_1, v_2)\end{aligned}$$

Měli bychom nejprve ověřit, že  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$  jsou opravdu báze vektorových prostorů  $\mathcal{V}$  a  $\mathcal{W}$ . A to tak, že přepsáním báze do matice dostaneme matici se správnou hodnotou (v tomto případě 3 a 4). Což zde zjevně platí.

$$\begin{aligned}h \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} &= 3 \\ h \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} &= 4\end{aligned}$$

Dále je třeba ověřit, zda  $\varphi$  je skutečně homomorfismus. Musíme zkontrolovat platnost vlastností z definice homomorfismu 46: Platnost první vlastnosti  $\varphi(\vec{u} + \vec{v}) = \varphi(\vec{u}) + \varphi(\vec{v})$  můžeme ověřit takto:

$$\begin{aligned}\varphi(\vec{u} + \vec{v}) &= \varphi((u_1 + v_1, u_2 + v_2, u_3 + v_3)) = (u_1 + v_1 + u_2 + v_2, u_2 + v_2 + u_3 + v_3, u_1 + v_1, u_2 + v_2) \\ \varphi(\vec{u}) + \varphi(\vec{v}) &= (u_1 + u_2, u_2 + u_3, u_1, u_2) + (v_1 + v_2, v_2 + v_3, v_1, v_2) \\ L &= P\end{aligned}$$

Platnost druhé vlastnosti bychom ověřili podobným způsobem.

Nyní přes  $\varphi$  zobrazíme vektory báze prostoru  $\mathcal{V}$  a vyjádříme tento obraz jako lineární kombinaci vektorů báze

prostoru  $\mathcal{W}$ :

$$\vec{w}_1 = \varphi(e_1) = (0, 1, 0, 0) = a_{11} \cdot (0, 0, 0, 1) + a_{12} \cdot (0, 0, -1, 0) + a_{13} \cdot (0, 1, 0, 0) + a_{14} \cdot (-1, 0, 0, 0)$$

$$\vec{w}_2 = \varphi(e_2) = (1, 3, 0, 1) = a_{21} \cdot (0, 0, 0, 1) + a_{22} \cdot (0, 0, -1, 0) + a_{23} \cdot (0, 1, 0, 0) + a_{24} \cdot (-1, 0, 0, 0)$$

$$\vec{w}_3 = \varphi(e_3) = (3, 5, 1, 2) = a_{31} \cdot (0, 0, 0, 1) + a_{32} \cdot (0, 0, -1, 0) + a_{33} \cdot (0, 1, 0, 0) + a_{34} \cdot (-1, 0, 0, 0)$$

Vyřešením těchto 3 soustav 4 lineárních rovnic dostaneme hodnoty koeficientů  $a$ , které tvoří matici homomorfismu: První řádek jde na první pohled vyřešit snadno jako:

$$a_{11} = a_{12} = a_{14} = 0$$

$$a_{13} = 1$$

Řádky 2 a 3 už nejsou tak zřejmé. Rozepíšeme tedy soustavu rovnic pro druhý řádek:

$$0 \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23} - 1 \cdot a_{24} = 1 \Rightarrow a_{24} = -1$$

$$0 \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} + 1 \cdot a_{23} + 0 \cdot a_{24} = 3 \Rightarrow a_{23} = 3$$

$$0 \cdot a_{21} - 1 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23} + 0 \cdot a_{24} = 0 \Rightarrow a_{22} = 0$$

$$1 \cdot a_{21} + 0 \cdot a_{22} + 0 \cdot a_{23} + 0 \cdot a_{24} = 1 \Rightarrow a_{21} = 1$$

Díky jednoduchému zadání báze  $\overline{\mathcal{B}}$  jsme byli schopni rovnou odvodit řešení této soustavy.

Nyní rozepíšeme a vyřešíme soustavu pro 3 řádek:

$$0 \cdot a_{31} + 0 \cdot a_{32} + 0 \cdot a_{33} - 1 \cdot a_{34} = 3 \Rightarrow a_{34} = -3$$

$$0 \cdot a_{31} + 0 \cdot a_{32} + 1 \cdot a_{33} + 0 \cdot a_{34} = 5 \Rightarrow a_{33} = 5$$

$$0 \cdot a_{31} - 1 \cdot a_{32} + 0 \cdot a_{33} + 0 \cdot a_{34} = 1 \Rightarrow a_{32} = -1$$

$$1 \cdot a_{31} + 0 \cdot a_{32} + 0 \cdot a_{33} + 0 \cdot a_{34} = 2 \Rightarrow a_{31} = 2$$

Ze zjištěných koeficientů nyní můžeme vyjádřit požadovanou matici homomorfismu  $\varphi$  v bázích  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$ :

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & -1 \\ 2 & -1 & 5 & -3 \end{pmatrix}$$

Matici homomorfismu můžeme použít k rychlému převádění vektorů mezi bázemi.

**Příklad** (Převod vektorů mezi bázemi)

Mějme vektorové prostory, báze,  $\varphi$  a matici homomorfismu z příkladu 7.1.

A mějme vektor  $\vec{w}_{\mathcal{B}}$  vyjádřený v bázi  $\mathcal{B}$ :

$$\vec{w}_{\mathcal{B}} = (2, 4, 3)$$

Vyjádřete tento vektor v bázi  $\overline{\mathcal{B}}$  jako  $\vec{w}_{\overline{\mathcal{B}}}$ .

To, že je vektor  $\vec{w}_{\mathcal{B}}$  vyjádřený v bázi  $\mathcal{B}$  znamená, že se jedná o lineární kombinaci vektorů  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  s koeficienty 2, 4, 3. Tento vektor můžeme převést do implicitní báze<sup>28</sup> následovně:

$$\vec{u} = (2 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 3 \cdot 1, 2 \cdot 0 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 2, 2 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 3) = (3, 10, 19)$$

Nyní tento vektor  $\vec{u}$  vyjádřený v kanonické bázi zobrazíme pomocí  $\varphi$ :

$$\vec{v} = \varphi(\vec{u}) = \varphi((3, 10, 19)) = (13, 29, 3, 10)$$

A nyní  $\vec{v}$  vyjádříme v bázi  $\overline{\mathcal{B}}$ :

$$\vec{v}_{\overline{\mathcal{B}}} = (10, -3, 29, -13)$$

V tomto případě jsme převod provedli bez využití matice homomorfismu. Provedli jsme převod na kanonickou bázi, zobrazení a nakonec převod do cílové báze.

Stejný výsledek ovšem můžeme dostat pomocí matice homomorfismu, který v sobě má tohle všechno v podstatě zahrnuto, stačí vektor  $\vec{w}_{\mathcal{B}}$  vynásobit maticí homomorfismu:

$$\vec{v}_{\overline{\mathcal{B}}} = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & -1 \\ 2 & -1 & 5 & -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & -3 & 29 & -13 \end{pmatrix}$$

**Definice 67** (Matice přechodu)

---

<sup>28</sup>Implicitní báze je obvyklá báze, ve které, i když třeba nechceme, musíme implicitně pracovat, abychom se mohli numericky vyjadřovat. Implicitní báze je obvykle  $((1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1))$ , takové bázi říkáme kanonická a může být podobně vyjádřena i pro jiné dimenze, než právě 3.

Mějme speciální případ matice homomorfismu, kde<sup>29</sup>:

$$\mathcal{V} = \mathcal{W}, \dim \mathcal{V} = n$$

$$\mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$$

$$\overline{\mathcal{B}} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)$$

$$\varphi = id$$

A matici homomorfismu v tomto speciálním případě říkáme matice přechodu od báze  $\mathcal{B}$  k bázi  $\overline{\mathcal{B}}$  a značíme ji  $M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B})$ .

Pro obecnou matici homomorfismu bychom museli přepsat obrazy do následující soustavy rovnic a tu vyřešit:

$$\vec{e}_1 = a_{11} \cdot \vec{f}_1 + \dots + a_{1n} \cdot \vec{f}_n$$

$$\vdots$$

$$\vec{e}_n = a_{n1} \cdot \vec{f}_1 + \dots + a_{nn} \cdot \vec{f}_n$$

Matici přechodu však můžeme vyjádřit jednodušeji, než obecnou matici homomorfismu, a to vyřešením následující maticové rovnice, která je ekvivalentní výše zmíněné soustavě rovnic, kde  $M_{\mathcal{B}}$  a  $M_{\overline{\mathcal{B}}}$  představují matice bází  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$ :

$$M_{\mathcal{B}} = A \cdot M_{\overline{\mathcal{B}}}$$

$$M_{\mathcal{B}} \cdot M_{\overline{\mathcal{B}}}^{-1} = A$$

Kde matice  $A$  je matice přechodu.

**Příklad** (Výpočet matice přechodu)

Spočítejte matici přechodu pro:

$$\mathcal{V} = \mathbb{R}^3$$

$$\mathcal{B} = ((3, 1, 2), (3, 2, 0), (1, 0, 0))$$

$$\overline{\mathcal{B}} = ((3, 3, 1), (4, 1, 0), (2, 2, -5))$$

Opět bychom měli nejprve ukázat, že se jedná o korektní báze. V tomto případě jsou obě báze korektní a jejich matice mají hodnost 3, tak jak potřebujeme.

---

<sup>29</sup>Příčemž  $id$  označuje funkci identity.

Když víme že se jedná o báze, můžeme spočítat matici přechodu:

$$M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) = M_{\mathcal{B}} \cdot M_{\overline{\mathcal{B}}}^{-1}$$

Zapišeme báze do matice:

$$M_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{\overline{\mathcal{B}}} = \begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 \\ 4 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & -5 \end{pmatrix}$$

A vyjádříme matici přechodu dle odvozeného vztahu:

$$M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) = M(\mathcal{B}) \cdot M(\overline{\mathcal{B}})^{-1} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3 & 3 & 1 \\ 4 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & -5 \end{pmatrix}^{-1}$$

Dopočítáním bychom dostali matici přechodu.

Následně pokud budeme mít nějaký vektor  $\vec{u}_{\mathcal{B}}$  vyjádřený v bázi  $\mathcal{B}$  a vynásobíme ho touto maticí přechodu dostaneme tentýž vektor v bázi  $\overline{\mathcal{B}}$ :

$$\vec{u}_{\mathcal{B}} \cdot M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) = \vec{u}_{\overline{\mathcal{B}}}$$

Tato matice se často používá ke transformaci vektorů mezi různými bázemi.

**Věta 14** (Podobnost matic endomorfismu v různých bázích)

Matice endomorfismu v různých bázích jsou podobné.

*Důkaz.* Uvažujme vektorový prostor  $\mathcal{V}$  dimenze  $m$ , který má dvě báze  $\mathcal{B}$  a  $\overline{\mathcal{B}}$ , a vektorový prostor  $\mathcal{W}$  dimenze  $n$ , který má dvě báze  $\mathcal{C}$  a  $\overline{\mathcal{C}}$  následovně:

$$\mathcal{V}, \dim \mathcal{V} = m, \mathcal{B} = (\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_m), \overline{\mathcal{B}} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_m)$$

$$\mathcal{W}, \dim \mathcal{W} = n, \mathcal{C} = (\vec{g}_1, \dots, \vec{g}_n), \overline{\mathcal{C}} = (\vec{h}_1, \dots, \vec{h}_n)$$

Nechť  $A$  je matice homomorfismu  $\varphi : \mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$  v bázích  $\mathcal{B}, \mathcal{C}$  a  $\overline{A}$  je matice homomorfismu  $\varphi$  v bázích  $\overline{\mathcal{B}}, \overline{\mathcal{C}}$ .

Z výše uvedeného můžeme odvodit následující vztahy:

$$\begin{aligned}\vec{w}_{\mathcal{B}} \cdot A &= \vec{v}_{\mathcal{C}} \\ \vec{w}_{\overline{\mathcal{B}}} \cdot \overline{A} &= \vec{v}_{\overline{\mathcal{C}}} \\ \vec{u}_{\mathcal{B}} \cdot M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) &= \vec{u}_{\mathcal{B}} \\ \vec{v}_{\mathcal{C}} \cdot M(\overline{\mathcal{C}}, \mathcal{C}) &= \vec{v}_{\mathcal{C}}\end{aligned}$$

A pomocí těchto vztahů odvodíme:

$$\begin{aligned}\vec{u}_{\overline{\mathcal{B}}} \cdot M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \cdot \overline{A} &= \vec{v}_{\overline{\mathcal{C}}} \cdot M(\overline{\mathcal{C}}, \mathcal{C}) \\ \vec{u}_{\overline{\mathcal{B}}} \cdot M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \cdot \overline{A} &= \vec{u}_{\mathcal{B}} \cdot A \cdot M(\overline{\mathcal{C}}, \mathcal{C}) \\ M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \cdot \overline{A} &= A \cdot M(\overline{\mathcal{C}}, \mathcal{C}) \\ \overline{A} &= M^{-1}(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \cdot A \cdot M(\overline{\mathcal{C}}, \mathcal{C})\end{aligned}$$

Pro  $\mathcal{V} = \mathcal{W}$ , tedy když  $\varphi$  je endomorfismus dostaneme:

$$\overline{A} = M^{-1}(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \cdot A \cdot M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B})$$

A tedy matice  $A$  a  $\overline{A}$  jsou v takovém případě podobné. □

Matice přechodu  $M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B})$  je vždy regulární, tedy:

$$\det M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) \neq 0$$

Můžeme tedy zavést následující relaci

$$\mathcal{B} \sim \overline{\mathcal{B}} \text{ pokud } \det M(\overline{\mathcal{B}}, \mathcal{B}) > 0$$

Takto definovaná relace  $\sim$  je relací ekvivalence, která rozdělí množinu bází na dvě třídy ekvivalence a to na souhlasně orientované báze a opačně orientované báze. To, zda jsou báze souhlasně, nebo opačně orientované pak může prakticky ovlivnit například znaménko determinantu (který vyjadřuje obsah). Orientovaný vektorový prostor je pak vektorový prostor, ve kterém je určena jedna z těchto dvou tříd bází.

## 7.2 Afinní prostory

V případě Afinních a později i Euklidovských prostorů se budeme omezovat na reálné pole z jistých důvodů, které později uvidíme. I když by se to dalo nějakým způsobem rozšířit, zůstaneme omezeni

na reálné pole s upozorněním na situace, kde by se to dalo rozšířit.

### Definice 68

Uvažujme neprázdnou množinu  $\mathcal{A} \neq \emptyset$ , reálný vektorový prostor  $\mathcal{V}$ ,  $\dim \mathcal{V} = n$  a zobrazení  $\varphi : \mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{V}$ , kde  $\varphi$  splňuje:

1.  $\varphi(X, Z) = \varphi(X, Y) + \varphi(Y, Z) \forall X, Y, Z \in \mathcal{A}$ . Respektuje sčítání vektorů
2.  $\exists O \in \mathcal{A}$  tak, že  $\varphi_O : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{V}$  definované  $\varphi_O(X) = \varphi(O, X)$  je bijekce.

Potom trojici  $(\mathcal{A}, \mathcal{V}, \varphi)$  nazveme *afinní prostor*. Přičemž:

- $\mathcal{A}$  označujeme jako *nosič afinního prostoru* a prvky  $\mathcal{A}$  se nazývají *body*.
- $\mathcal{V}$  označujeme jako *zaměření afinního prostoru* a jeho prvky nazýváme (*volné*) *vektory*

### Příklad (Ověření afinního prostoru)

Mějme:

$$\mathcal{A} = \mathbb{R}^n \text{ (pouze kartézská mocnina)}$$

$$\mathcal{V} = \mathbb{R}^n \text{ (vektorový prostor, včetně potřebných operací)}$$

$$\varphi(X, Y) = (y_1 - x_1, \dots, y_n - x_n)$$

Musíme ověřit, zda je splněno všechno co je požadováno v definici afinního prostoru.

Kontrola splnění podmínek pro  $\varphi$

1.  $\varphi(X, Y) + \varphi(Y, Z) = (z_1 - x_1, \dots, z_n - x_n) = \varphi(X, Z)$
2. Stačí zvolit  $O = [0, \dots, 0] : \varphi_O(X) = \varphi(O, X) = (x_1, \dots, x_n)$  a tedy:  $\varphi_O : [x_1, \dots, x_n] \rightarrow (x_1, \dots, x_n)$

V bodu 2 vidíme, že se jedná o bijekci, obě podmínky jsou tedy splněny. Bod  $O$  v tomto případě dokonce můžeme zvolit zcela libovolně a pořadí se bude jednat o bijekci. Což vlastně znamená, že je v této geometrii jedno kde zvolíme počátek.

### Příklad (Ověření složitějšího afinního prostoru)

Mějme:

$$\mathcal{A} = \{[x_1, x_2] \in \mathbb{R}^2, \frac{x_1^2}{\alpha^2} - \frac{x_2^2}{\beta^2} = 1; \alpha > 0, \beta > 0\}$$

$$\mathcal{V} = \mathbb{R}$$

$$\varphi(X, Y) = x_2 - y_2$$

Jedná se o afinní prostor?

Je nutné ověřit platnost podmínek z definice afinního prostoru.

$\mathcal{A}$  je zjevně neprázdná množina, např.  $[\alpha, 0] \in \mathcal{A}$ . Navíc se jedná o rovnici hyperboly. Kontrola splnění podmínek pro  $\varphi$

1. První podmínka zjevně platí.
2. Druhou podmínku nelze v tomto případě splnit.

Druhá podmínka nelze splnit protože vezmeme-li libovolný bod  $O = [o_1, o_2]$ , potom můžeme vzít dva různé body  $X = [a, x_2]$ ,  $\bar{X} = [b, x_2]$  ležící na různých větvích hyperboly ve stejné výšce a dostaneme dva vzory, které se zobrazí na jeden obraz následovně:

$$\varphi_O(X) = x_n - o_2$$

$$\varphi_O(\bar{X}) = x_n - o_2$$

A nemůže se tedy jednat o bijekci, druhá podmínka tedy není splněna a nejedná se o afinní prostor.

**Definice 69** (Repér afinního prostoru)

Uvažujme nosič afinního prostoru  $\mathcal{A}$  se zvoleným počátkem  $O$  a zaměřením afinního prostoru  $\mathcal{V}$  na bázi  $\mathcal{B} = (\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n)$ . Potom můžeme uvažovat následující  $(n + 1)$ -tici:

$$\langle O; \vec{u}_1, \dots, \vec{u}_n \rangle$$

Kterou nazveme repér afinního prostoru.

Repér tedy vyjadřuje počátek a báze vektory afinního prostoru.

Změna repéru obecně obsahuje dva kroky:

1. Změnu báze vektorového prostoru (např. pomocí matice přechodu).
2. Posunutí počátku (přidání nějakého vektoru).

**Definice 70** (Dimenze afinního prostoru)

Uvažujme afinní prostor  $(\mathcal{A}, \mathcal{V}, \varphi)$  dimenze afinního prostoru je dimenze jeho zaměření.

$$\dim(\mathcal{A}, \mathcal{V}, \varphi) = \dim \mathcal{V}$$

**Definice 71** (Vnitřní součin)

Uvažujme reálný vektorový prostor  $\mathcal{V}$ , potom je vnitřní součin  $\pi$  definován následovně:

$$\pi : \mathcal{V} \times \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{R}$$



*A musí splňovat následující podmínky:*

1.  $\pi(\vec{u} + \vec{v}, \vec{w}) = \pi(\vec{u}, \vec{v}) + \pi(\vec{v}, \vec{w}) \quad \forall \vec{u}, \vec{v}, \vec{w} \in \mathcal{V}$  *Aditivita v první složce*
2.  $\pi(c \cdot \vec{u}, \vec{v}) = c \cdot \pi(\vec{u}, \vec{v}) \quad \forall c \in \mathbb{R}, \forall \vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{V}$  *Homogenita v první složce*
3.  $\pi(\vec{u}, \vec{v}) = \pi(\vec{v}, \vec{u}) \quad \forall \vec{u}, \vec{v} \in \mathcal{V}$  *Symetrie*
4.  $\pi(\vec{u}, \vec{u}) \geq 0$  a pokud  $\pi(\vec{u}, \vec{u}) = 0 \Rightarrow \vec{u} = \vec{0}$

*První dvě podmínky dohromady se nazývají linearita, linearita je tedy aditivita + homogenita. Nutnost platnosti symetrie nám také implikuje nutnost platnosti aditivity a homogenity i v druhé složce.*

*Pokud jsou všechny tyto podmínky splněny, řekneme že  $\pi$  je vnitřní součin<sup>30</sup> na  $\mathcal{V}$ .*

Nejčastěji je vnitřní součin definován následovně:

$$\pi(\vec{u}, \vec{v}) = \sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i = u_1 \cdot v_1 + \dots + u_n \cdot v_n$$

Ale můžeme ho zavést i jinak, například nad  $\mathbb{R}^2$  takto:

$$\pi_{new}(\vec{u}, \vec{v}) = 3 \cdot u_1 \cdot v_1 - u_1 \cdot v_2 - u_2 \cdot v_2 + 2 \cdot u_2 \cdot v_2$$

Důležité je splnění vlastností požadovaných z definice (které jsou v tomto případě splněny).

Nejobvyklejší vnitřní součin tedy není jediný a můžeme ho zavést i nějak jinak. V případě že ho zavedeme jinak, tak to má ovšem nějaké konsekvence, protože o vnitřní součin se opírá velikost vektorů, úhly mezi vektory a vlastně celá geometrie. Běžný vnitřní součin vede na základní „plochou“ geometrii, které bude probírána dále.

**Definice 72** (Euklidovský prostor)

*Afinní prostor, na kterém je definovaný vnitřní součin nazveme Euklidovský prostor.*

**Definice 73** (Norma vektoru indukovaná vnitřním součinem)

$$\|\vec{u}\| = \sqrt{\pi(\vec{u}, \vec{u})}$$

**Definice 74** (Metrika indukovaná vnitřním součinem)

$$d(X, Y) = \|\varphi(X, Y)\|$$

---

<sup>30</sup>Často se také říká skalární součin, případně dot product a místo  $\pi(\vec{u}, \vec{v})$  pak používáme značení  $\vec{u} \cdot \vec{v}$

## Reference

Přednášky SLA 1 - 7, přednášející: Kureš Miroslav, Doc. RNDr., Ph.D.