

1 Úvod

Definice 1.1 (Matice)

Reálná matice typu $m \times n$ je obdélníkové schéma (tabulka) reálných čísel. Prvek na pozici (i, j) matice A značíme a_{ij} nebo A_{ij} . A i -tý řádek matice A značíme A_{i*} a j -tý řádek matice A značíme A_{*j} .

Definice 1.2 (Vektor)

Reálný n -rozměrný aritmetický sloupcový vektor (standardní) je matice typu $n \times 1$ a řádkový $1 \times n$.

Definice 1.3 (Soustava lineárních rovnic)

Lineární = neznámé jsou v 1. mocnině.

Soustava = více rovnic.

Rovnice výraz z neznámých (bez absolutního členu) a koeficientů rovný konstantě.

Definice 1.4 (Řešení)

Řešením rozumíme každý vektor hodnot neznámých vyhovující všem rovnicím.

Definice 1.5 (Matice soustavy)

Matice soustavy je matice koeficientů u neznámých.

Rozšířená matice soustavy je matice soustavy „následována“ vektorem hodnot konstant jednotlivých rovnic.

Poznámka (Geometrický význam)

Průsečík n „přímek“ v n rozměrném prostoru

Definice 1.6 (Elementární řádkové úpravy)

- Vynásobení řádku nenulovým reálným číslem.
- Přičtení jednoho řádku k druhému.
- Výměna dvou řádků. (Není elementární, protože jde vytvořit pomocí prvních dvou.)

Tvrzení 1.1

Elementární řádkové operace zachovávají množinu řešení soustavy.

┌

Důkaz

Elementární úpravou neztratíme žádné řešení, protože pokud je x řešením před úpravou, je i po úpravě. A naopak ho lze invertovat, takže žádné řešení ani nepřibude. \square

└

Definice 1.7 (Odstupňovaný tvar matice REF)

Matice $A \in^{m \times n}$ je v řádkově odstupňovaném tvaru, pokud existuje r takové, že platí: řádky $1, \dots, r$ (tzv. bazické) jsou nenulové (obsahují alespoň 1 nenulový prvek), řádky $r + 1, \dots, m$ jsou nulové, a navíc označíme-li jako $p_i = \min j; a_{ij} \neq 0$ (tzv. pivot) pozici prvního nenulového prvku v i -tém řádku, tak platí: $p_1 < p_2 < \dots < p_r$.

┌

Například

Matice, které jsou, a matice, které nejsou.

└

Definice 1.8 (Hodnota matice)

Počet nenulových řádků po převodu do odstupňovaného tvaru (nebo libovolného s maximálním počtem nulových řádků) značený $\text{rank}(A)$.

Dále jsme dělali Gaussovu eliminaci (nemá řešení ($\text{rank}(A) \neq \text{rank}(A|b)$), má 1 řešení ($\text{rank}(A|b) = n$), má mnoho řešení (pak bazické proměnné vyjádřím pomocí nebazických)).

Definice 1.9 (Redukovaný odstupňovaný tvar matice RREF)

Matice v odstupňovaném tvaru je v redukovaném OT, jestliže $\forall 0 \leq i \leq r, i \in: a_{ip_i} = 1 \wedge \forall i > x \in a_{xp_i} = 0$.

Poznámka

Tento tvar je jednoznačný.

Definice 1.10 (Rovnost matic)

Dvě matice se rovnají, pokud mají stejné rozměry a stejné prvky na stejných souřadnicích.

Definice 1.11 (Součet matic)

Pro součet musí mít matice stejné rozměry a poté sčítáme po složkách.

┌

Poznámka (Vlastnosti)

Komutativita (pokud jsou prvky matice komutativní).

└

Definice 1.12 (Násobení skalárem)

Násobíme po složkách.

Definice 1.13 (Součin matic)

Nechť $A \in^{m \times n}$ a $B \in^{n \times o}$ jsou matice. Potom matice $C \in^{m \times o}$ definovaná jako $c_{ij} = a_{i*} \cdot b_{*j}$ je jejich součinem.

┌

Poznámka (Vlastnosti)

Komutativita neplatí.

Asociativita, distributivita zleva a distributivita zprava platí. Stejně tak „asociativita“ násobení skalárem.

Definice 1.14 (Transpozice)

Buď $A \in^{m \times n}$. Potom $A^T \in^{n \times m}$ definována jako $(A^T)_{ij} = a_{ji}$ je transponovaná matice A .

Poznámka (Vlastnosti)

Je sama sobě inverzním zobrazením. Distributivita pro všechny operace (pozor u násobení je antisymetrická).

$$\begin{aligned}(A^T)^T &= A \\ (A + B)^T &= A^T + B^T \\ (\alpha A)^T &= \alpha A^T \\ (AB)^T &= B^T A^T\end{aligned}$$

Definice 1.15 (Symetrická a antisymetrická matice)

Matice A je symetrická, pokud $A = A^T$, a antisymetrická $A = -A^T$.

Poznámka (Vlastnosti)

Symetrické matice jsou uzavřené na součet, ale na součin ne.

Definice 1.16 (Jednotkový vektor)

e_j definovaný jako $(e_j)_j = 1$ a $\forall i \neq j (e_j)_i = 0$ je j -tý jednotkový vektor.

┌
Poznámka (Vlastnosti)

$$Ae_i = A_{*i}$$

$$e_i^T = A_{i*}$$

└

Definice 1.17 (Skalární součin vektorů)

$u \cdot v = u^T v$ je skalární součin vektorů u a v .

uv^T je ? součin vektorů u a v

Poznámka (Zápis SLR jako maticové násobení)

SLR lze zapsat jako $Ax = b$.

Poznámka (Matice a lineární zobrazení $x \rightarrow Ax$)

Je užitečné se na matici $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ jako na určité zobrazení z \mathbb{R}^n do \mathbb{R}^m definované předpisem $x \rightarrow Ax$.

Na řešení SLR se lze pak dívat jako na vzor b v zobrazení dané A .

Zároveň na maticový součin se lze dívat na skládání $(BA)x = B(Ax)$. (Základní motivace, aby se součin definoval tak, jak je.)

TODO?

Definice 1.18 (Regulární matice)

Buď $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Pak následující tvrzení jsou ekvivalentní:

1. A je regulární,
2. $\text{RREF}(A) = \mathcal{I}_n$,
3. $\text{rank}(A) = n$
4. pro nějaké $b \in \mathbb{R}^n$ má soustava $Ax = b$ jediné řešení,
5. pro všechna $b \in \mathbb{R}^n$ má soustava $Ax = b$ jediné řešení.

Matice A nesplňující tvrzení je singulární.

Tvrzení 1.2 (Uzavřenost na součin)

Buďte $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ regulární matice. Pak AB je také regulární.

┌ *Důkaz*

Buď x řešení soustavy $ABx = 0$. Chceme ukázat, že x musí být nulový vektor. Z předchozího tvrzení $\forall y Ay = 0$ má jediné řešení. Zároveň $\forall y Bx = y$ má jediné řešení. \square

└

Tvrzení 1.3

Je-li alespoň jedna z matic $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$, pak AB je také singulární.

┌ *Důkaz*

Je-li matice B singulární, pak $Bx = 0$ pro nějaké $x \neq 0$. Z toho ale plyne $(AB)x = A(Bx) = A(0) = 0$, tedy i AB je singulární.

Nyní předpokládejme, že matice B je regulární, tedy matice A singulární a existuje $y \neq 0$ takové, že $Ay = 0$. Z regularity matice B existuje $x \neq 0$ takové, že $Bx = y$. Celkem dostáváme $(AB)x = A(Bx) = Ay = 0$, tedy AB je singulární. \square

└

Definice 1.19 (Matice elementárních úprav)

Elementární úpravy jdou reprezentovat násobením tzv. elementární maticí zleva: $E_i(\alpha)$ jako násobení řádku i číslem α je jednotková matice s α místo i -té jedničky. E_{ij} jako prohození řádků i, j je jednotková matice s prohozeným i -tým a j -tým řádkem, ...

Tyto matice jsou regulární.

Věta 1.4

Buď $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Pak $\text{RREF}(A) = QA$ pro nějakou regulární matici $Q \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

┌ *Důkaz*

$\text{RREF}(A)$ získáme aplikací konečně mnoha elementárních řádkových úprav a součin regulárních matic je regulární matice. \square

└

Tvrzení 1.5

Každá regulární matice $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se dá vyjádřit jako součin konečně mnoha elementárních matic.

┌ *Důkaz*

Elementární úpravy lze invertovat elementárními úpravami, tedy i inverze úprav regulární matice na \mathcal{I} je regulární (a \mathcal{I} je také regulární). \square

└

Definice 1.20 (Inverzní matice)

Buď $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Pak A^{-1} je inverzní maticí k A , pokud splňuje $AA^{-1} = A^{-1}A = \mathcal{I}_n$.

┌ *Například*

$\mathcal{I}_n^{-1} = \mathcal{I}_n$, 0_n^{-1} neexistuje.

Věta 1.6 (O existenci inverzní matice)

Bud' $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Je-li A regulární, pak k ní existuje inverzní matice a je určena jednoznačně. Naopak, existuje-li A^{-1} , pak A je regulární.

┌ *Důkaz*

Existence: A je regulární, tedy soustava $Ax = e_j$ má řešení x_j pro každé j . Ukážeme, že $A^{-1} = (x_1 | x_2 | \dots | x_n)$ je hledaná inverze. (Porovnáním po sloupcích: $(AA^{-1})_{*j} = Ax_j = e_j = \mathcal{I}_{*j}$. Komutativní výraz dokážeme $A(A^{-1}A - \mathcal{I}) = AA^{-1}A - A = \mathcal{I}A - A = 0$, $A^{-1}A - \mathcal{I}$ je vektor, který je jednoznačně určen tím, že A je regulární.)

Jednoznačnost. Necht' pro nějakou matici B platí $AB = BA = \mathcal{I}$. Pak

$$B = B\mathcal{I} = B(AA^{-1}) = (BA)A^{-1} = \mathcal{I}A^{-1} = A^{-1}.$$

Naopak. Necht' pro A existuje inverzní matice. Bud' x řešení soustavy $Ax = 0$. Pak

$$x = \mathcal{I}x = (A^{-1}A)x = A^{-1}(Ax) = A^{-1}0 = 0,$$

┌ tedy A je regulární. □

Tvrzení 1.7 (Vlastnosti inverzní matice)

Je-li A regulární, pak A^T je regulární.

┌ *Důkaz*

Je-li A regulární, pak existuje inverze a platí $AA^{-1} = A^{-1}A = \mathcal{I}_n$. Po transponování všech stran dostaneme

$$(AA^{-1})^T = (A^{-1}A)^T = \mathcal{I}_n^T,$$

neboli

$$(A^{-1})^T A^T = A^T (A^{-1})^T = \mathcal{I}_n.$$

Matice A^T má inverzi a je tudíž regulární. (Navíc $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$, občas se značí A^{-T}).

Věta 1.8 (Jedna rovnost stačí)

Bud'te $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Je-li $BA = I_n$, pak obě matice A, B jsou regulární a navzájem k sobě inverzní, to jest $B = A^{-1}$ a $A = B^{-1}$.

┌ *Důkaz*

Regularita vyplývá z dřívějšího tvrzení vzhledem k regularitě \mathcal{I}_n . Tudíž existují inverze A^{-1} , B^{-1} . Odvodíme

$$B = B\mathcal{I}_n = B(AA^{-1}) = (BA)A^{-1} = \mathcal{I}_n A^{-1} = A^{-1}.$$

└ Úplně stejně druhá rovnost. □

Poznámka (Výpočet inverzní matice)

Důkaz věty ukázal návod: j -tý sloupec A^{-1} je řešením soustavy $Ax = e_j$.

Věta 1.9 (Výpočet inverzní matice)

Buď $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Je-li $\text{RREF}(A|\mathcal{I}_n) = (\mathcal{I}_n|B)$, pak $B = A^{-1}$, jinak je A singulární.

┌ *Důkaz*

Je-li $\text{RREF}(A|\mathcal{I}_n) = (\mathcal{I}_n|B)$, potom existuje regulární Q tak, že $(\mathcal{I}_n|B) = Q(A|\mathcal{I}_n)$. Po roztržení na dvě části $\mathcal{I}_n = QA$ tj. $Q = A^{-1}$ a $B = Q\mathcal{I}_n = Q = A^{-1}$.

└ Pokud není toho tvaru, pak z definice A není regulární. □

Tvrzení 1.10 (Vlastnosti inverzní matice)

Buďte $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ regulární. Pak:

1. $(A^{-1})^{-1} = A$
2. $(A^{-1})^T = (A^T)^{-1}$
3. $(\alpha A)^{-1} = \frac{1}{\alpha} A^{-1} \quad \dots \quad (\alpha \neq 0)$
4. $(AB)^{-1} = B^{-1} A^{-1}$

┌ *Důkaz*

└ 1., 2. triviální, 3. vynásobím $A\alpha$, 4. přezávorkuji. □

┌ *Poznámka*

└ Pro $(A+B)^{-1}$ žádný jednoduchý vzoreček není.

Poznámka (Inverzní matice a soustava rovnic)

Buď Q regulární. Pak soustava $Ax = b$ je ekvivalentní s $(QA)x = (Qb)$.

Důkaz

Žádné řešení neztratíme, zpět se dostaneme přednásobením Q^{-1} zleva. □

Věta 1.11 (Soustava rovnic a inverzní matice)

Buď $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ regulární. Pak řešení soustavy $Ax = b$ je dáno vzorcem $A^{-1}b = x$.

Poznámka (Inverzní matice - geometrie)

Buď $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ regulární matice. Pro každé $y \in \mathbb{R}^n$ existuje právě jedno $x \in \mathbb{R}^n$ takové, že $Ax = y$, zobrazení je tedy bijekcí.

Poznámka

Skládání zobrazení nám může dát i vzhled do toho, jak funguje inverze součinu matic.

2 Grupy

Abstraktní algebraické struktury k popisu symetrií.

Definice 2.1 (Grupa)

Grupa je dvojicí (G, \circ) , kde G je množina a $\circ : G^2 \rightarrow G$ je binární operace na množině splňující

$$\forall a, b, c \in G : a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c, \text{ (asociativita)}$$

$$\exists e \in G \forall a \in G : e \circ a = a \circ e = a, \text{ neutrální prvek}$$

$$\forall a \in G \exists b \in G : a \circ b = b \circ a = e. \text{ (inverzní prvek)}$$

Definice 2.2 (Abelova grupa)

Abelova grupa je grupa, která splňuje

$$\forall a, b \in G : a \circ b = b \circ a. \text{ (komutativita)}$$

Poznámka

Je-li operací sčítání, pak neutrální prvek značíme 0 a opačný $-a$.

Je-li operací sčítání, pak neutrální prvek značíme 1 a opačný $\frac{1}{a}$.

Například

Abelovy grupy: $(\mathbb{Z}, +)$, $(\mathbb{Q}, +)$, $(\mathbb{R}, +)$, $(\mathbb{C}, +)$, $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot)$, $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$, $(\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$, grupa matic $(\mathbb{R}^{m \times n}, +)$, $(\mathbb{R}^{m \times n} \setminus \{0\}, \cdot)$

Ne nutně abelovy grupy: množina všech zobrazení na množině s operací skládání, množina regulárních matic řádu n s násobením, ...

Negrupy: $(\mathbb{N}, +)$, $(\mathbb{Z}, -)$, $(\mathbb{Z} \setminus \{0\}, \cdot)$, $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, :)$, ...

Tvrzení 2.1 (Vlastnosti grup)

Prvky grupy (G, \circ) splňují následující vlastnosti

1. $a \circ c = b \circ c$ implikuje $a = b$ (krácení),
2. neutrální prvek je jednoznačně určen,
3. $\forall a \in G$ je jeho inverzní prvek určen jednoznačně,
4. rovnice $a \circ x = b$ má právě jedno řešení $\forall a, b \in G$,
5. $(a^{-1})^{-1} = a$,
6. $(a \circ b)^{-1} = b^{-1} \circ a^{-1}$

┌

Důkaz

1. $a \circ c = b \circ c \implies a \circ (c \circ c^{-1}) = b \circ (c \circ c^{-1}) \implies a \circ e = b \circ e \implies a = b$.
2. Necht e_1, e_2 jsou neutrální prvky $\implies e_1 = e_1 \circ e_2 = e_2$.
3. Inverzní prvky a_1 a a_2 k a $\implies a_1 \circ a = e = a_2 \circ a \implies a_2 = a_1$.
4. Vynásobením rovnice prvkem a^{-1} zleva dává $x = a^{-1} \circ b$.
5. $e = e \implies (a^{-1})^{-1} \circ a^{-1} = a \circ a^{-1}$.
6. $e = e \implies (a \circ b)^{-1} \circ (a \circ b) = b^{-1} \circ b = b^{-1} \circ e \circ b = (b^{-1} \circ a^{-1}) \circ (a \circ b)$.

└

□

Definice 2.3 (Podgrupa)

Podgrupa grupy (G, \circ) je grupa (H, \circ_H) taková, že platí $H \subseteq G$ a pro všechna $a, b \in H$ platí $a \circ b = a \circ_H b$.

Neboli v H platí uzavřenost TODO.

2.1 permutace

Definice 2.4 (Vzájemně jednoznačné)

Zobrazení je vzájemně jednoznačné (bijekce), pokud je prosté a na.

Definice 2.5 (Permutace)

Permutace je vzájemně jednoznačné zobrazení množiny na sebe samu.

Poznámka (Možné zápisy permutací)

Tabulkou (nahore vzory, dole obrazy), grafem (šipka vede ze vzoru do obrazu), rozložením na cykly (v závorce jsou ve skupinkách čísla, které se postupně zobrazují na sebe, prvky které se zobrazují sami na sebe, tak se nemusí psát)

Definice 2.6 (Identita, transpozice, inverzní permutace)

Permutace zobrazující každý prvek na sebe se nazývá identita (id).

Transpozice je permutace, která prohazuje dva prvky. (Permutace s jediným „nejednotkovým“ cyklem, který má 2 prvky).

Pro permutace p, q je složená permutace $p \circ q$ daná předpisem $(p \circ q)(i) = p(q(i))$.

Inverzní permutace (p^{-1}) k permutaci p je daná předpisem $p \circ p^{-1} = id$. (Např transpozice sama k sobě.)

Definice 2.7 (Znaménko permutace)

Pokud se permutace $p \in S_n$ skládá z k cyklů, pak znaménkem permutace je číslo $\text{sgn}(p) = (-1)^{n-k}$.

┌

Například

$\text{sgn}(id) = 1, \text{sgn}((i, j)) = -1, \text{sgn}((1, 3, 4)(2, 5)) = -1$

└

Věta 2.2 (O znaménku složení permutace s transpozicí)

Bud' $p \in S_n$ permutace a $t = (i, j) \in S_n$ transpozice. Pak

$$\text{sgn}(p) = -\text{sgn}(t \circ p) = -\text{sgn}(p \circ t)$$

┌

Důkaz

Stačí dokázat jednu rovnost, druhá je analogicky. Rozlišíme dva případy, pokud jsou i, j ve stejném cyklu, pak se transpozicí rozpadne, pokud jsou v jiném, tak se naopak spojí, tedy se v obou případech změní počet cyklů o 1 a znaménko tedy na $-$ původní. \square

└

Věta 2.3

Každou permutaci lze rozložit na složení transpozic.

Důkaz

Postupně na transpozice rozložíme všechny cykly. □

Důsledek

Platí $\text{sgn}(p) = (-1)^r$, kde r je počet transpozic v rozkladu permutace p .

Pro $p, q \in S_n$ platí $\text{sgn}(p \circ q) = \text{sgn}(p) \cdot \text{sgn}(q)$.

Pro $p \in S_n$ platí $\text{sgn}(p) = \text{sgn}(p^{-1})$.

Definice 2.8 (Symetrická grupa)

Množina permutací S_n tvoří s operací skládání \circ takzvanou symetrickou grupu (S_n, \circ) .

Poznámka

Symetrické grupy popisují symetrie různých objektů.

Každá grupa je isomorfní nějaké podgrupě symetrické grupy (např. rubikova grupa (popisující r. kostku) je isomorfní S_{48}).

2.2 Algebraická tělesa

Zobecnění číselných oborů jako např. \mathbb{R} .

Definice 2.9 (Těleso)

Těleso je množina \mathbb{T} spolu se dvěma komutativními binárními operacemi $+$ a \cdot splňujícími: $(\mathbb{T}, +)$ je Abelova grupa (neutrální prvek 0, inverzním k a je $-a$), $(\mathbb{T} \setminus \{0\}, \cdot)$ je Abelova grupa (neutrální prvek 1, inverzním k a je a^{-1}), $\forall a, b, c \in \mathbb{T} : a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$ (distributivita).

Poznámka

Operace nemusí představovat klasické sčítání a násobení.

Budeme psát ab místo $a \cdot b$.

Každé těleso má alespoň dva prvky, protože $0 \neq 1$

Zavedeme značení pro inverzní operace, jak je známe.

Například

Tělesa jsou \mathbb{Q} , \mathbb{R} , \mathbb{C} , \mathbb{Z}_p (např. nejmenší možné těleso \mathbb{Z}_2), kvaterniony (pokud definujeme těleso jako ne nutně komutativní).

\mathbb{Z} ne.

Tvrzení 2.4 (Vlastnosti těles)

$0a = 0, ab = 0$ implikuje $a = 0$ nebo $b = 0$, $-a = (-1)a$.

┌

Důkaz

Jednoduchý, podobný vlastnostem grup.

□

Poznámka (Konečná tělesa)

Na množině \mathbb{Z}_n uvažme operace $+$ a \cdot modulo n . Pak \mathbb{Z}_2 a \mathbb{Z}_3 tělesa jsou, ale \mathbb{Z}_4 ne ($\neq 2^{-1}$).

Lemma 2.5

Pro prvočíslo n a nenulové $a \in \mathbb{Z}_n$ při násobení modulo n platí

$$\{0, 1, \dots, n-1\} = \{0a, 1a, \dots, (n-1)a\}.$$

┌

Důkaz

Sporem, necht $ka \equiv la \pmod{n}$ pro nějaká různá $k, l \in \mathbb{Z}_n$. Pak $(k-l)a \equiv 0 \pmod{n}$.

Protože n je prvočíslo, n dělí a nebo $k-l$.

□

Věta 2.6

Množina \mathbb{Z}_n tvoří těleso právě tehdy, když n je prvočíslo.

┌

Důkaz

Pokud $n = pq$ pro $1 < p, q < n$, pak je-li \mathbb{Z}_n těleso, pak $pq \equiv 0 \pmod{n}$ implikuje $p = 0$ a $q = 0$.

Pro n je prvočíslo stačí ověřit axiomy tělesa. (Existence inverze a^{-1} plyne z lemmatu výše.)

□

Věta 2.7 (O velikosti konečných těles)

Konečná tělesa existují právě o velikostech p^n , kde p je prvočíslo a $n \geq 1$.

Důkaz (Pouze jedním směrem, druhým si ho nebudeme ukazovat)

$$GF(p^n) = \{a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_1x + a_0 : a_0, \dots, a_{n-1} \in \mathbb{Z}_p\}.$$

Sčítání je definováno jako pro běžné polynomy (modulo p). Násobení je definováno jako násobení pro běžné polynomy (modulo p) modulo ireducibilní (= nerozložitelný) polynom stupně n . \square

Poznámka

GF, protože Galois field (Galoisova tělesa). Každé konečné těleso je izomorfní s nějakým GF.

Definice 2.10 (Charakteristika tělesa)

Charakteristika tělesa \mathbf{T} je nejmenší $n \in \mathbb{N}$ takové, že $1 + \dots + 1 = 0$ (1 je tam n krát). Pokud takové n neexistuje, pak ji definujeme jako 0.

Tvrzení 2.8

Charakteristika každého tělesa je buď nula, nebo prvočíslo.

┌ *Důkaz*

Protože $0 \neq 1$, tak charakteristika nemůže být 1.

Sporem: pokud by charakteristika byla složené číslo $n = pq$, tak $0 = n(n \text{ jedniček}) = p(p \text{ jedniček}) \cdot q(q \text{ jedniček})$, tedy $p = 0$ nebo $q = 0$ (vlastnosti tělesa), *lightning*. \square

Věta 2.9 (Malá fermatova věta)

Pro každé prvočíslo p a nenulové $a \in \mathbb{Z}_p$ platí $a^{p-1} = 1$.

┌ *Důkaz*

Z prvočíselnosti p již víme, že platí lemma výše.

Protože $0a = 0$, tak $\{1, \dots, p-1\} = \{1a, \dots, (p-1)a\}$.

Tedy $1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (p-1) = (1a) \cdot (2a) \cdot \dots \cdot ((p-1)a)$. Zkrátím a vyjde $1 = a^{p-1}$. \square

Poznámka

Následně jsme si ukazovali použití v samoopravných kódech (nejdříve pouze zdvojení a ztrojení bitů, poté tzv. Hammingův kód(...), kde se násobí maticemi $\mathbb{Z}_2^{3 \times 7}$).

3 Vektorové prostory

Definice 3.1 (Vektorový prostor)

Buď \mathbf{T} těleso s neutrálními prvky 0 a 1 pro sčítání a násobení. Vektorový prostor nad \mathbf{T} je množina V s operacemi sčítání vektorů $+: V^2 \rightarrow V$ a násobení vektoru skalárem $\cdot: \mathbf{T} \times V \rightarrow V$ splňující pro každé $\alpha, \beta \in \mathbf{T}$ a $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$: TODO!

Například

Aritmetický prostor \mathbf{T}^n nad \mathbf{T} . Prostor matic $\mathbf{T}^{m \times n}$ nad \mathbf{T} . Prostor \mathcal{P} všech reálných polynomů proměnné x nad tělesem \mathbb{R} . Prostor \mathcal{P}^n všech reálných polynomů proměnné $x \leq n$ stupně nad tělesem \mathbb{R} . Prostor \mathcal{F} všech reálných funkcí. Prostor \mathcal{C} všech spojitých reálných funkcí, ...

Tvrzení 3.1 (Základní vlastnosti vektorových prostorů)

V prostoru V nad tělesem \mathbf{T} platí pro každý skalár $\alpha \in \mathbf{T}$ a vektor $\mathbf{v} \in V$

$$0\mathbf{v} = \mathbf{o},$$

$$\alpha\mathbf{o} = \mathbf{o}$$

$$\alpha\mathbf{v} = \mathbf{o} \implies \mathbf{v} = \mathbf{o} \vee \alpha = 0$$

$$-\mathbf{v} = (-1)\mathbf{v}$$

Důkaz

Stejný jako u ostatních vlastností. □

Definice 3.2 (Vektorové podprostory)

Podmnožina U vektorového prostoru V nad tělesem \mathbf{T} je podprostorem V právě tehdy, když platí:

$$\mathbf{o} \in U,$$

$$\forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in U : \mathbf{u} + \mathbf{v} \in U,$$

$$\forall \alpha \in \mathbf{T} \forall \mathbf{u} \in U : \alpha\mathbf{u} \in U.$$

Důkaz

Jednoduchý? □

Například

Triviální podprostory V jsou V a $\{\mathbf{o}\}$.

Každá přímka procházející počátkem je podprostorem \mathbb{R}^2 .

$\mathcal{P}^n, \mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{F}$ jsou v tomto pořadí podprostory dalších.

Množina symetrických reálných matic řádu n je podprostorem $\mathbb{R}^{n \times n}$.

Množina \mathbb{Q}^n nad \mathbb{Q} je podprostorem \mathbb{R}^n nad \mathbb{Q} , ale není podprostorem \mathbb{R}^n nad \mathbb{R} .

Tvrzení 3.2

Nechť \mathbf{V} je vektorový prostor nad tělesem \mathbb{T} . Pak průnik libovolného systému $\{\mathbf{V}_i\}_{i \in I}$ vektorových podprostorů prostoru \mathbf{V} je vektorový podprostor \mathbf{V} .

Důkaz

Podle tvrzení výše stačí ověřit uzavřenost a obsažení nulového prvku. Obojí je zřejmé z toho, že prvek je v průniku právě tehdy, když je prvkem všeho, přes co děláme průnik. \square

Definice 3.3 (LO)

Pro vektorový prostor \mathbf{V} nad tělesem \mathbb{T} a $W \subseteq \mathbf{V}$ je průnik všech podprostorů obsahujících W lineárním obalem množiny \mathbf{W} . Značíme (W) .

Definice 3.4 (Generátory a množiny generátorů)

Nechť $\mathbf{U} = (W)$, pak říkáme, že W generuje prostor \mathbf{U} a prvky množiny W jsou generátory prostoru \mathbf{U} .

Pokud \mathbf{U} je generovaný nějakou konečnou množinou, pak je konečně generovaný.

Definice 3.5 (Lineární kombinace)

Viz definice v OM1!

Věta 3.3

Lineární obal je roven podprostoru generovaného stejnou množinou vektorů.

Důkaz

Inkluze jedním směrem se dokáže z uzavřenosti, druhým směrem to dokážeme tak, že LO je uzavřený na operace \mathbf{V} a obsahuje všechny „generující vektorový“. \square

Definice 3.6 (Lineárně závislé a lineárně nezávislé)

Nechť \mathbf{V} je vektorový prostor nad \mathbb{T} a nechť $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n \in \mathbf{V}$. Pak vektory $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ jsou lineárně nezávislé, pokud $\sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{v}_i = \mathbf{0}$ nastane pouze pro $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0$. V opačném případě jsou lineárně závislé.

Definice 3.7

Nekonečná množina vektorů je nezávislá, pokud je každá její konečná podmnožina nezávislá.

Věta 3.4

Nechť \mathbf{V} je vektorový prostor nad \mathbb{T} a nechť $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n \in \mathbf{V}$. Pak jsou tyto vektory lineárně závislé právě tehdy, když nějaký z nich patří do lineárního obalu zbytku. (Lze jeden z nich vyjádřit jako lineární kombinaci zbylých vektorů.)

Důkaz

Úpravami rovnic z definicí. □

Definice 3.8

Nechť \mathbf{V} je vektorový prostor nad \mathbb{T} . Pak bázi je jakýkoliv lineárně nezávislý systém generátorů prostoru \mathbf{V} .

Věta 3.5

Nechť báze \mathbf{V} je konečná. Pak každý vektor z \mathbf{V} lze jednoznačně vyjádřit jako lineární kombinaci báze.

Důkaz

Snadný. □

Věta 3.6

Každý vektorový prostor má bázi.

Důkaz

Dokážeme jen pro konečně generované: systém generátorů buď je lineárně nezávislý (a tím pádem báze), nebo z něj postupně můžeme odebírat prvky pomocí jedné z předchozích vět, až zbudou jen lineárně nezávislé - báze. □

Lemma 3.7 (O výměně)

Nechť $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n$ je systémem generátorů vektorového prostoru \mathbf{V} a nechť $\mathbf{x} \in \mathbf{V}$ má vyjádření $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mathbf{y}_i$. Pak pro libovolné k takové, že $\alpha_k \neq 0$ je $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_{k-1}, \mathbf{x}, \mathbf{y}_{k+1}, \dots, \mathbf{y}_n$ systémem generátorů prostoru \mathbf{V} .

Důkaz

Jelikož $\alpha_k \neq 0$, tak můžeme vyjádřit \mathbf{y}_k z ostatních vektorů a \mathbf{x} . Následně ukážeme, že nová množina generuje celé \mathbf{V} , protože do původního vyjádření $\mathbf{z} \in \mathbf{V}$ dosadíme za \mathbf{y}_k a výsledek bude lineární kombinace \mathbf{x} a ostatních vektorů (bez \mathbf{y}_k). □

Věta 3.8 (Steinitzova věta o výměně)

Nechť \mathbf{V} je vektorový prostor, $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m$ je lineárně nezávislý systém ve \mathbf{V} a nechť $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n$ je systém generátorů \mathbf{V} . Pak platí: a) $m \leq n$, b) existují navzájem různé indexy k_1, \dots, k_{n-m} takové, že vektory $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m, \mathbf{y}_{k_1}, \dots, \mathbf{y}_{k_{n-m}}$ tvoří systém generátorů prostoru \mathbf{V} .

┌ *Důkaz*

Postupujeme indukci podle m . Pro $m = 0$ věta platí triviálně. Nechť tedy věta platí pro $m - 1$. Pokud $m - 1 = n$, pak z předpokladu $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{m-1}$ generují \mathbf{V} . Tedy $\mathbf{x}_m \in \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{m-1}\}$, což je spor s lineární nezávislostí, tedy $m \leq n$. Tj. a) platí.

Protože z předpokladu $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{m-1}, \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_{l_{n-m+1}}$ generují \mathbf{V} , tak lze \mathbf{x}_m vyjádřit jako jejich lineární kombinaci a použít Lemma o výměně. Tím jsme dokázali část b). \square

└

Důsledek

Všechny báze konečně generovaného vektorového prostoru \mathbf{V} jsou stejně velké.

┌ *Důkaz*

Nechť \mathbf{x} ka a \mathbf{y} ka jsou dvě báze prostoru \mathbf{V} . Potom \mathbf{x} je nezávislé a \mathbf{y} generuje, tedy použijeme Steinitzovu větu a ukážeme, že kdyby byly jinak velké, tak dojdeme ke sporu. \square

└

Definice 3.9 (Dimenze)

Dimenze konečně generovaného prostoru je velikost nějaké jeho báze. Dimenze prostoru, který není konečně generovaný, je ∞ . Značíme ji $\dim \mathbf{V}$.

Tvrzení 3.9

Pro \mathbf{V} platí:

Jsou-li $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m \in \mathbf{V}$ LZ, pak $m \leq \dim \mathbf{V}$. Pokud $m = \dim \mathbf{V}$, pak je $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_m$ bází prostoru \mathbf{V} .

Jsou-li $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n$ generátory, pak $n \geq \dim \mathbf{V}$. Pokud $n = \dim \mathbf{V}$, pak $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n$ je bází prostoru \mathbf{V} .

┌ *Důkaz*

Vyplývá ze Steinitzovy věty o výměně (uvažují nějakou bázi a vyměním ji za dané vektory). \square

└

Věta 3.10

Každý lineárně nezávislý systém vektorového prostoru \mathbf{V} lze rozšířit na bázi prostoru \mathbf{V} .

┌ *Důkaz*

Vezmu si bázi a vyměním jejich prvky za tyto lineárně nezávislé vektory. \square

└

Věta 3.11

Dimenze podprostoru je menší rovna dimenzi prostoru.

┌

Důkaz

Dokážeme, že existuje báze podprostoru a tím pádem (jelikož je nezávislá) podle tvrzení výše je dimenze menší rovna □

Definice 3.10 (Spojení podprostorů)

Spojení podprostorů \mathbf{U} a \mathbf{V} ($\mathbf{U} + \mathbf{V}$) vektorového prostoru \mathbf{W} (odtud operace $+$ dále) je definováno jako $\{\mathbf{u} + \mathbf{v} : \mathbf{u} \in \mathbf{U}, \mathbf{v} \in \mathbf{V}\}$.

Tvrzení 3.12

Pro podprostory \mathbf{U} a \mathbf{V} VP \mathbf{W} platí $\mathbf{U} + \mathbf{V} = (\mathbf{U} \cup \mathbf{V})$.

┌

Důkaz

Inkluze \subseteq je triviální z uzavřenosti na součty prostoru $(\mathbf{U} \cup \mathbf{V})$.

┌

Inkluze \supseteq se dokáže jako $\mathbf{U} + \mathbf{V} \supseteq \mathbf{U} \cup \mathbf{V}$ a $\mathbf{U} + \mathbf{V}$ je podprostor \mathbf{W} . □

Věta 3.13 (O dimenzi spojení a průniku)

Pro podprostory \mathbf{U} a \mathbf{V} VP \mathbf{W} platí:

$$\dim(\mathbf{U} + \mathbf{V}) + \dim(\mathbf{U} \cap \mathbf{V}) = \dim \mathbf{U} + \dim \mathbf{V}.$$

┌

Důkaz

┌

Přes báze. □

Definice 3.11 (Direktní součet)

Pokud $\mathbf{U} \cap \mathbf{V} = \{\mathbf{o}\}$, pak spojení $\mathbf{U} + \mathbf{V}$ nazýváme direktním součtem podprostorů a značíme $\mathbf{U} \oplus \mathbf{V}$.

Podle předchozí věty platí $\dim(\mathbf{U} \oplus \mathbf{V}) = \dim \mathbf{U} + \dim \mathbf{V}$. Navíc každý prvek direktního součinu lze zapsat jednoznačně jako součet vektoru z \mathbf{U} a vektoru z \mathbf{V} .

Definice 3.12 (Maticové prostory)

Pro matici A definujeme sloupcový prostor $S(A) = \{\text{sloupců matice}\}$, řádkový prostor $R(A) = \{\text{řádků matice}\}$, jádro $\text{Ker}(A) = \{\mathbf{x} : A\mathbf{x} = \mathbf{o}\}$.

Poznámka

Všechny 3 prostory jsou podprostory příslušných VP. (2 jsou lineární obaly, jádro jistě obsahuje \mathbf{o} , protože $A\mathbf{o} = \mathbf{o}$, uzavřenosti poté dokážeme z distributivity a komutativity)

Tvrzení 3.14

$$S(A) = \{A\mathbf{x}\}, \quad R(A) = \{A^T\mathbf{x}\}$$

Důkaz

Plyne z definice součinu při řádkovém pohledu. □

Tvrzení 3.15

Pro každý \mathbf{V} podprostor \mathbb{T}^n existují matice tak, že $\mathbf{V} = S(A)$, $\mathbf{V} = R(B)$, $\mathbf{V} = \text{Ker}(C)$.

Důkaz

Veden přes generátory. Jádro si ukážeme později. □

Tvrzení 3.16

$R(QA)$ je podprostorem $R(A)$ a pokud lze vyjádřit k -tý sloupec A pomocí lineární kombinace ostatních, tak lze i k -tý sloupec QA vyjádřit pomocí stejné lineární kombinace ostatních sloupců QA .

Důkaz

Přes transpozice ukážeme $\forall x \in R(QA) : x = (QA)^T y = A^T(Q^T y) \in R(A)$.

$$(QA)_{*k} = QA_{*k} = Q\left(\sum_{j \neq k} \alpha_j A_{*j}\right) = \sum_{j \neq k} \alpha_j (QA)_{*j}.$$

Pozor

Pro sloupcové první část předchozího tvrzení neplatí pro násobení zleva, protože se neshodují vektorové „nadprostory“.

Věta 3.17

Pro matici A a její RREF tvar A^R platí, že nenulové řádky RREF tvaru tvoří bázi $R(A)$, že báze (v RREF) sloupce původní matice tvoří bázi $S(A)$ a že $\dim R(A) = \dim S(A) = \text{rank}(A)$.

┌ *Důkaz*

$A^R = QA$, tedy podle tvrzení výše je $R(A) = R(QA) = R(A^R)$.

└ □

Důsledek

$$\text{rank}(A) = \text{rank}(A^T)$$

Věta 3.18

Pro každou matici $A \in \mathbb{T}^{m \times n}$ platí $\dim \text{Ker}(A) + \text{rank}(A) = n$.

┌ *Důkaz*

Viz přednáška.

└ □

Poznámka

Dále jsme si zmiňovali eigenfaces a Lagrangeův interpolační polynom.

Definice 3.13 (Lineární zobrazení (někdy homomorfismus))

Budte \mathbf{U}, \mathbf{V} vektorové prostory nad tělesem \mathbb{T} . Zobrazení $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ je lineární, pokud pro každé $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{U}$ a $\alpha \in \mathbb{T}$ platí:

$$f(\mathbf{x} + \mathbf{y}) = f(\mathbf{x}) + f(\mathbf{y}),$$

$$f(\alpha x) = \alpha f(x).$$

Například

$f(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$, $f(\mathbf{x}) = \mathbf{o}$, $\text{id}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}$, $f(A) = A^T$, derivace z prostoru reálných diferencovatelných funkcí do prostoru reálných funkcí.

Tvrzení 3.19 (Vlastnosti lineárních zobrazení)

Obraz lineární kombinace vektorů je lineární kombinace obrazů těchto vektorů.

Nulový vektor se zobrazí na nulový vektor.

┌ *Důkaz*

Indukcí z definice lineárního zobrazení.

└ $f(\mathbf{o}) = f(0 \cdot \mathbf{o}) = 0 \cdot f(\mathbf{o}) = \mathbf{o}.$

└ □

Definice 3.14 (Obraz a jádro)

Buď $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ lineární zobrazení. Pak definujeme 1. obraz $f(\mathbf{U}) := \{f(\mathbf{x}); \mathbf{x} \in \mathbf{U}\}$ a 2. jádro $\text{Ker}(f) := \{\mathbf{x} \in \mathbf{U}; f(\mathbf{x}) = \mathbf{o}\}$.

Tvrzení 3.20

Obraz je podprostorem VP do kterého je dané lineární zobrazení, jádro je podprostorem VP ze kterého je dané lineární zobrazení.

Důkaz

Stačí ověřit, že obsahují \mathbf{o} a že jsou uzavřené na součty a násobky. □

Tvrzení 3.21

Obraz lineárního obalu je lineární obal obrazů těchto vektorů.

Důkaz

Rozdělíme na dvě inkluze. Jedno dokážeme tím, že obraz lineární kombinace je lineární kombinace obrazů. Druhou pak z toho, že obraz je podprostor, tedy s vektory obsahuje i jejich lineární obal. □

Definice 3.15 (Zobrazení prosté (injektivní) a na (surjektivní))

Zobrazení $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ je na, pokud $f(\mathbf{U}) = \mathbf{V}$ (tedy u lineárního zobrazení právě tehdy, pokud se nějaké generátory zobrazí na nějaké generátory).

Zobrazení f je prosté, když $f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{y}) \implies \mathbf{x} = \mathbf{y}$.

Věta 3.22 (Prosté lineární zobrazení)

Lineární zobrazení je prosté právě tehdy, pokud je jádro \mathbf{o} a to je právě tehdy, když obraz libovolné lineárně nezávislé množiny je lineárně nezávislá množina.

Důkaz

$(1 \implies 2)$ je z definice, $(2 \implies 3)$ je z toho, že obraz lineární kombinace je lineární kombinace obrazů, $(3 \implies 1)$ sporem $f(x) = f(y) \implies f(x) - f(y) = \mathbf{o} \implies f(x - y) = \mathbf{o}$. □

Důsledek

Speciálně lineární zobrazení je prosté, když se dimenze obrazu rovná dimenzi vzoru.

Věta 3.23 (Lineární zobrazení a jednoznačnost vůči obrazům báze)

Buďte \mathbf{U}, \mathbf{V} prostory nad \mathbb{T} a $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ báze \mathbf{U} . Pak pro libovolné vektory $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n \in \mathbf{V}$ existuje právě jedno lineární zobrazení takové, že $f(\mathbf{x}_i) = \mathbf{y}_i, i = 1, \dots, n$.

┌
Důkaz

Libovolný vektor vyjádříme jako lineární kombinaci x_i a zobrazíme na lineární kombinaci y_i . Jednoznačnost sporem přes dvě vyjádření lineární kombinací. □

└

Definice 3.16 (Matice lineárního zobrazení)

Buď $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$, $B_{\mathbf{U}} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$ báze prostoru \mathbf{U} nad \mathbb{T} a $B_{\mathbf{V}} \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m\}$ báze prostoru \mathbf{V} nad \mathbb{T} . Necht $f(\mathbf{x}_j) = \sum_{i=1}^m a_{ij} \mathbf{y}_i$. Potom matice $A \in \mathbb{T}^{m \times n}$ s prvky a_{ij} , se nazývá matice lineárního zobrazení f vzhledem k bázím $B_{\mathbf{U}}, B_{\mathbf{V}}$ a značí se ${}_{B_{\mathbf{V}}} [f]_{B_{\mathbf{U}}}$.

Věta 3.24 (Maticová reprezentace lineárního zobrazení)

Buď $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$, $B_{\mathbf{U}} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$ báze prostoru \mathbf{U} nad \mathbb{T} a $B_{\mathbf{V}} \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m\}$ báze prostoru \mathbf{V} nad \mathbb{T} . Pak $\forall x \in \mathbf{U}$ je

$$[f(x)]_{B_{\mathbf{V}}} = {}_{B_{\mathbf{V}}} [f]_{B_{\mathbf{U}}} \cdot [x]_{B_{\mathbf{U}}}.$$

┌
Důkaz

└ Přes sumy. □

Důsledek

Každé lineární zobrazení $f : \mathbb{T}^m \rightarrow \mathbb{T}^n$ se dá vyjádřit jako matice.

Věta 3.25 (Jednoznačnost matice lineárního zobrazení)

Buď $f : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$, $B_{\mathbf{U}} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$ báze prostoru \mathbf{U} nad \mathbb{T} a $B_{\mathbf{V}} \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m\}$ báze prostoru \mathbf{V} nad \mathbb{T} . Pak jediná matice A splňující $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{U} : [f(\mathbf{x})]_{B_{\mathbf{V}}} = A \cdot [\mathbf{x}]_{B_{\mathbf{U}}}$ je $A = {}_{B_{\mathbf{V}}} [f]_{B_{\mathbf{U}}}$.

┌
Důkaz

Sporem. $\mathbf{A} \neq \mathbf{A}'$ jsou 2 reprezentace. Tudíž existuje vektor $\mathbf{s} \in \mathbb{T}^n$ takový, že $\mathbf{A}\mathbf{s} \neq \mathbf{A}'\mathbf{s}$. Pak ale nesplňují podmínku. □

└

Poznámka

Naopak každá matice představuje matici nějakého lineárního zobrazení.

┌
Důkaz

└ Ve sloupcích vyčtu, kam zobrazuje f bázi. □

Definice 3.17 (Matice přechodu)

Buď \mathbf{V} vektorový prostor a B_1 a B_2 dvě jeho báze. Pak maticí přechodu od B_1 k B_2 nazveme matici ${}_{B_2} [id]_{B_1}$.

Tvrzení 3.26 (Složené lineární zobrazení)

Složení lineárních zobrazení je lineární.

┌

Důkaz

└ Podle definice ověříme pro libovolné vektory a prvek tělesa.

□

Věta 3.27 (Matice složeného lineárního zobrazení)

Matice složeného zobrazení dostaneme jako součin matic příslušných skládaným zobrazením.