13. Vlastnosti a druhy lineárních zobrazení

Obraz a jádro

Cv. 13.1 Pro lineární zobrazení $f\colon \mathbb{R}^{2\times 2} \to \mathbb{R}^{2\times 2}$ dané předpisem $A \mapsto (A - A^T)$ rozhodněte, které vektory patří do jádra a které do obrazu:

(a) I_2,

(b) $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$,

(c) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$,

(d) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$.

Řešení:

Matice A patří do jádra f, pokud $f(A) = 0_{2\times 2}$. Naopak matice A patří do obrazu zobrazení f, pokud existuje matice B taková, že $f(B) = A$.

(a) Patří do jádra, neboť $I_2 - I_2^T = 0_{2\times 2}$. Naopak nepatří do obrazu, protože by musela existovat B, že

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

To ale není možné, protože pro prvek na pozici $(1,1)$ by musel být splněn vztah

$$0 = b_{11} - b_{11} = 1.$$

(b) Patří do jádra i do obrazu (je obrazem sama sebe).

(c) Patří do jádra, neboť

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

Naopak nepatří do obrazu, protože na diagonále jsou nenulové prvky.

(d) Nepatří do jádra, neboť

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

Aby matice patřila do obrazu, musela by existovat B taková, že

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Rozepsáním po složkách dostáváme soustavu

$$\begin{aligned} b_{11} - b_{11} &= 0, \\ b_{12} - b_{21} &= 1, \\ b_{21} - b_{12} &= -1, \\ b_{22} - b_{22} &= 0. \end{aligned}$$

První a poslední rovnice odpovídají $0 = 0$ a zbylé dvě rovnice jsou ekvivalentní. Soustava se tedy zjednoduší na jedinou rovnici

$$b_{12} - b_{21} = 1.$$

Hledaných matic je tedy nekonečně mnoho a jsou tvaru

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{21}+1 \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}, \quad b_{11}, b_{21}, b_{22} \in \mathbb{R}.$$

Příkladem jedné konkrétní matice B může být

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Závěr: Daná matice patří do obrazu.

Cv. 13.2 Uvažujme lineární zobrazení $f\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$. Označme lineární zobrazení $f^1 = f$, $f^2 = f \circ f$, $f^n = f \circ f^{n-1}$. Ukažte, že $\operatorname{Ker}(f^{(n-1)}) \subseteq \operatorname{Ker}(f^n)$.

Řešení:
Pokud $v \in \operatorname{Ker}(f^{n-1})$, pak ze vztahu $f^{n-1}(v) = o$ platí

$$f^n(v) = f(f^{n-1}(v)) = f(o) = o.$$

Proto také $v \in \operatorname{Ker}(f^n)$.

Cv. 13.3 Buď $f\colon \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^2$ lineární zobrazení zadané

$$f(1,0,1) = (0,1)^T, \quad f(0,1,1) = (-1,0)^T, \quad f(1,1,0) = (1,0)^T.$$

(a) Určete $\dim f(\mathbb{R}^3)$ a $\dim \operatorname{Ker}(f)$.

(b) Najděte bázi $f(\mathbb{R}^3)$ a $\operatorname{Ker}(f)$.

Řešení:

(a) Pro jednodušší manipulaci si vyjádříme zobrazení pomocí maticové reprezentace ${}_{\text{kan}}[f]_B$, kde $B = \{(1,0,1)^T, (0,1,1)^T, (1,1,0)^T\}$. Dostáváme

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Uvedená matice má dimenzi řádkového (a tedy i sloupcového) prostoru rovnou 2 a dimenzi jádra rovnou 1. Tyto dimenze odpovídají $\dim f(\mathbb{R}^3)$ a $\dim \operatorname{Ker}(f)$.

(b) V předchozí úloze jsme ukázali, že $\dim f(\mathbb{R}^3) = 2$. Protože $f(\mathbb{R}^3) \subseteq \mathbb{R}^2$, dostáváme dokonce $f(\mathbb{R}^3) = \mathbb{R}^2$. Libovolná báze prostoru $\mathbb{R}^2$ je proto bází obrazu $f(\mathbb{R}^3)$. Obecně bázi obrazu můžeme zkonstruovat z obrazů báze původního prostoru, tedy vektorů $(0,1)^T, (-1,0)^T, (1,0)^T$. V tomto případě je druhý vektor závislý na třetím, jeho odstraněním dostáváme bázi prostoru $\mathbb{R}^2$.

Pro určení báze jádra můžeme využít maticové reprezentace a nalézt řešení soustavy

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} x = 0.$$

Množina řešení má tvar $\{(0, x_3, x_3)^T;\ x_3 \in \mathbb{R}\}$. Pozor, tato množina odpovídá množině *souřadnic* bází vzhledem k bázi B, protože

$$o = [f(x)]_{\mathrm{kan}} = {}_{\mathrm{kan}}[f]_B \cdot [x]_B.$$

Zvolíme-li z jádra matice například vektor $[x]_B = (0,1,1)^T$, odpovídající vektor $x \in \mathrm{Ker}(f)$ dopočítáme jako

$$x = 0 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 1 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Cv. 13.4 Co je obrazem prostoru $\mathrm{span}\{\sin x, \cos x\}$ při zobrazení s maticí $\left(\begin{smallmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{smallmatrix}\right)$ vzhledem k bázím $\{\cos x - \sin x,\ \sin x\}$ a $\{\cos x + \sin x,\ \cos x\}$?

Řešení:
Z definice konstrukce maticové reprezentace lineárního zobrazení vůči daným bázím lze z maticové reprezentace vyčíst předpis dané funkce

$$\begin{aligned} f(\cos x - \sin x) &= 0 \cdot (\cos x + \sin x) + 1 \cdot \cos x = \cos x, \\ f(\sin x) &= 0 \cdot (\cos x + \sin x) + 0 \cdot \cos x = 0. \end{aligned}$$

Dostáváme tedy, že obraz bude

$$\mathrm{span}\{\cos x,\ 0\} = \mathrm{span}\{\cos x\}.$$

Jádro pak má tvar $\mathrm{span}\{\sin x\}$.

Cv. 13.5 Buď $f\colon U \to V$ lineární zobrazení a W podprostor $f(U)$. Dokažte, že tzv. úplný vzor

$$f^{-1}(W) = \{x \in U;\ f(x) \in W\}$$

je podprostor prostoru U.

Řešení:
Stačí ukázat, že $o \in f^{-1}(W)$ a že je tato množina uzavřená na operace. Protože je W vektorový podprostor, obsahuje o. Z vlastností lineárního zobrazení je jedním z vektorů x splňujících $f(x) = o$ i nulový vektor o. Tedy $o \in f^{-1}(W)$.

Mějme dále $x, y \in f^{-1}(W)$. Z definice $f^{-1}(W)$ existují $a, b \in W$ takové, že $f(x) = a$ a $f(y) = b$. Protože W je vektorový podprostor, také $a + b \in W$. Úpravami dostáváme

$$a + b = f(x) + f(y) = f(x + y).$$

Dle definice vektor $x + y \in f^{-1}(W)$, množina je proto uzavřená na sčítání.

Obdobně mějme $x \in f^{-1}(W)$ a skalár α. Platí, že existuje $y \in W$, že $f(x) = y$ a také platí $\alpha y \in W$. Pomocí úprav

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

a definice $f^{-1}(W)$ vektor $\alpha x \in f^{-1}(W)$, množina je proto uzavřená na násobení.

Zobrazení prosté a na

Cv. 13.6 Mějme lineární zobrazení $f\colon \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ zadané obrazem báze B:

$$\begin{aligned} f(2,1,1) &= (1,2,3)^T, \\ f(1,3,5) &= (3,2,1)^T, \\ f(7,1,4) &= (1,1,1)^T. \end{aligned}$$

Zjistěte, jestli je zobrazení prosté (pokud není, najděte vektory $u, v \in \mathbb{R}^3$ takové, že $u \neq v \wedge f(u) = f(v)$) a jestli je „na“ (pokud ne, najděte vektor, který nemá předobraz, tedy $u \in \mathbb{R}^3$ takové že $\forall v \in \mathbb{R}^3\colon f(v) \neq u$). Určete dimenzi a bázi obrazu a jádra tohoto lineárního zobrazení.

Řešení:

Prostota: Napřed určíme, jestli je zobrazení prosté (injektivní). Pokud by nebylo, pak by nutně existovaly dva různé vektory $u, v \in \mathbb{R}^3$ (z definičního oboru) takové, že $f(u) = f(v)$. Upravme si tuto situaci:

$$\begin{aligned} f(u) &= f(v), \\ {}_A[f]_B \cdot [u]_B &= {}_A[f]_B \cdot [v]_B, \\ {}_A[f]_B \cdot [u]_B - {}_A[f]_B \cdot [v]_B &= o, \\ {}_A[f]_B \cdot ([u]_B - [v]_B) &= o, \end{aligned}$$

kde ${}_A[f]_B$ značí matici lineárního zobrazení a $[u]_B, [v]_B$ značí vektory souřadnic vektorů u, v vůči bázi B, tedy $[f(u)]_A = {}_A[f]_B \cdot [u]_B$. V našem případě je báze A kanonická báze. Tedy pokud je zobrazení prosté, pak jeho matice má ve svém jádře jediný vektor o.

Sestrojíme tedy matici (bude brát vektory souřadnic v bázi B a vracet vektory souřadnic v kanonické bázi):

$${}_{\text{kan}}[f]_B = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Pomocí Gaussovy eliminace najdeme její jádro:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 0 & -4 & -1 \\ 0 & -8 & -2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Vidíme, že jádro má dimenzi jedna a všechna řešení této homogenní soustavy mají tvar: $\left\{(-\frac{1}{4}t, -\frac{1}{4}t, t)^T;\ t \in \mathbb{R}\right\}$. Můžeme volit vektor $[u]_B = (1, 1, -4)^T$, tedy

$$u = 1 \cdot (2, 1, 1)^T + 1 \cdot (1, 3, 5)^T - 4 \cdot (7, 1, 4)^T = (-25, 0, -10)^T,$$

který se zobrazí na nulu (stejně jako nulový vektor)

$$f(0, 0, 0) = (0, 0, 0)^T = f(-25, 0, -10).$$

Všimněte si, že souřadnice vektoru z jádra matice byly vůči bázi B, my chtěli souřadnice vektoru u v kanonické bázi, museli jsme tedy ještě řešit převod mezi souřadnicemi.

Dimenze jádra: Vzhledem k tomu, že jádro lineárního zobrazení má dimenzi jedna, tak jeho bázi může tvořit například vektor $u = (-25, 0, -10)^T$ (vzpomeňte, jak jsme na něj přišli – platí, že $[(-25, 0, -10)^T]_B = (1, 1, -4)$).

Obraz a surjektivita (jestli je „na“): Každý vektor z obrazu je lineární kombinací sloupcových vektorů. Speciálně existuje vektor $a \in \mathbb{R}^3$ takový, že $f(a) = (1, 2, 3)^T$ (psáno v kanonické bázi), to byl náš zadaný vektor $(2, 1, 1)^T$, který měl v bázi B souřadnice $[(2, 1, 1)^T]_B = (1, 0, 0)^T$.

Z minulé Gaussovy eliminace vidíme, že dimenze obrazu (což je dimenze sloupcového prostoru, což dle věty z přednášky je rovné dimenzi řádkového prostoru) je rovná dvěma a její báze jsou například první dva sloupci matice ${}_{\mathrm{kan}}[f]_B$, tedy vektory $(1, 2, 3)^T$, $(3, 2, 1)^T$ (obraz je pak lineární obal těchto dvou vektorů). Dimenze obrazu je tedy dva a zobrazení f není „na“.

Vektor mimo obraz: Doplněním těchto dvou vektorů na bázi $\mathbb{R}^3$ získáme vektor, který nemá předobraz ve zobrazení f. Například to může být vektor $(0, 0, 1)^T$ (pokud bychom nedoplňovali z kanonické báze, ale z jiné, mohl nám vyjít jiný vektor).

Cv. 13.7 Jak poznáme ze zadané matice $A \in \mathbb{T}^{m \times n}$ lineárního zobrazení $f\colon U \to V$, že zobrazení f je prosté, resp. „na“?

Řešení:

Lineární zobrazení je prosté právě tehdy, když $\mathrm{Ker}(f) = \{o\}$. Z toho plyne, že je zobrazení prosté právě tehdy, když

$$\mathrm{Ker}(A) = \{o\}.$$

Jinými slovy, musí $0 = \dim \mathrm{Ker}(A) = n - \mathrm{rank}(A)$, neboli $\mathrm{rank}(A) = n$. To znamená, že matice A má lineárně nezávislé sloupce.

Lineární zobrazení je „na“ právě tehdy, když dimenze obrazu odpovídá dimenzi prostoru V. Z toho plyne, že lineární zobrazení je „na“ právě tehdy, když

$$\mathrm{rank}(A) = m.$$

To znamená, že matice A má lineárně nezávislé řádky.

Cv. 13.8 Rozhodněte, zda je dané lineární zobrazení prosté a zda je „na":

(a) $f\colon \mathbb{R}^{2\times 2} \to \mathbb{R}^3$ dané předpisem $f\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = (a+b+c,\ a+b,\ a)^T$,

(b) $f\colon \mathcal{P}^2 \to \mathbb{R}^4$ dané předpisem $f(ax^2+bx+c) = (a+b,\ 2b-c,\ a-b+c,\ a+b)^T$,

(c) $f\colon \mathcal{P}^2 \to \mathbb{R}^3$ dané předpisem $f(ax^2+bx+c) = (a+b,\ c,\ a+b)^T$,

(d) $f\colon \mathcal{P}^2 \to \mathbb{R}^3$ dané předpisem $f(ax^2+bx+c) = (a+b,\ 2b-c,\ a-b)^T$.

Řešení:

Ve všech případech můžeme vycházet z toho, že lineární zobrazení $f\colon U \to V$ je prosté právě tehdy, když

$$\mathrm{Ker}(f) = \{o\}$$

a je „na" právě tehdy, když

$$\dim f(U) = \dim V.$$

(a) Zobrazení není prosté, protože

$$(a+b+c, a+b, a)^T = (0,0,0)^T$$

má netriviální řešení, například $a = b = c = 0$ a $d \in \mathbb{R}$.
Zobrazení je „na", protože dimenze prostoru

$$\{(a+b+c, a+b, c)^T;\ a,b,c \in \mathbb{R}\}$$

je 3. To lze nahlédnout například tak, že lze vygenerovat vhodnout volbou koeficientů a,b,c vektory $(1,1,1)^T, (1,1,0)^T, (1,0,0)^T$, které jsou lineárně nezávislé.

(b) Zobrazení není prosté, protože rovnice

$$(a+b,\ 2b-c,\ a-b+c,\ a+b)^T = (0,0,0,0,0)^T$$

má množinu řešení $\{(a,-a,-2a)^T;\ a \in \mathbb{R}\}$.
Zobrazení není ani „na", protože $\mathcal{P}^2$ má dimenzi 3, zatímco $\mathbb{R}^4$ má dimenzi 4. Při lineárním zobrazení se může dimenze zachovat nebo se snížit.

(c) Zobrazení není prosté, protože rovnice

$$(a+b,\ c,\ a+b)^T = (0,0,0)^T$$

má množinu řešení $\{(a,-a,0)^T;\ a \in \mathbb{R}\}$.
Zobrazení není ani „na", protože hodnoty v první a poslední složce jsou si vždy rovny. V obrazu tedy neleží například vektor $(1,0,0)^T$.

(d) Zobrazení je prosté, protože rovnice

$$(a+b,\ 2b-c,\ a-b)^T = (0,0,0)^T$$

má pouze triviální řešení.
Zobrazení je „na", protože množina obrazů $\{(a+b, c, a-b)^T;\ a,b,c \in \mathbb{R}\}$ se dá vyjádřit jako

$$\{a(1,0,1)^T + b(1,0,-1)^T + c(0,1,0)^T;\ a,b,c \in \mathbb{R}\}.$$

Vidíme, že obrazem je lineární obal vektorů $(1,0,1)^T$, $(1,0,-1)^T$, $(0,1,0)^T$, které jsou lineárně nezávislé. Dimenze obrazu je proto 3, stejně jako dimenze prostoru $\mathcal{P}^2$.

Isomorfismus

Cv. 13.9 Rozhodněte, zda zobrazení $f\colon \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ dané předpisem

$$f(x, y, z) = (x + y - 2z,\ y - z,\ x - y)^T$$

je isomorfismem $\mathbb{R}^3$ na sebe sama (takzvaným automorfismem).

Řešení:
Isomorfismus dvou vektorových prostorů je vzájemně jednoznačné lineární zobrazení (tedy lineární zobrazení, které je bijekce). Budeme chtít zjistit dimenzi jádra (pokud je zobrazení prosté, tak má být nulová) a dimenzi obrazu = dimenzi sloupcového prostoru (pokud má být zobrazení „na“, tak musí být stejná jako dimenze prostoru, do kterého to zobrazení jde).

Sestavíme matici zobrazení vůči kanonické bázi (jakákoliv báze by posloužila stejně):

$${}_{\mathrm{kan}}[f]_{\mathrm{kan}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Abychom určili rank této matice, provedeme Gaussovu eliminaci:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -2 & 2 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Vidíme, že dimenze jádra matice je rovna jedné, takže zobrazení není prosté. To můžeme i snadno ověřit: $f(0, 0, 0) = (0, 0, 0)^T = f(1, 1, 1)$.

Obdobně dimenze sloupcového prostoru je rovná dvěma (vzpomeňte na větu, že dimenze sloupcového a řádkového prostoru se rovnají). Tedy funkce není „na“. Opět bychom mohli ověřit, že například vektor $(0, 0, 1)^T$ není v obraze (stejná Gaussova eliminace doplněná o pravou stranu).

Závěr: zobrazení f není isomorfismem.

Cv. 13.10 Rozhodněte, jestli jsou následující dvojice vektorových prostorů isomorfní. Pokud ano, najděte vhodný isomorfismus.

(a) $\mathbb{R}^{2\times 2}$ a $\mathbb{R}^4$,

(b) $\mathbb{R}^4$ a $\mathcal{P}^3$ (prostor reálných polynomů stupně nejvýš tři),

(c) $\mathbb{R}^{m\times n}$ a $\mathbb{R}^{n\times m}$,

(d) $\mathbb{R}^n$ nad $\mathbb{R}$ a $\mathbb{C}^n$ nad $\mathbb{C}$,

(e) $\mathbb{R}^2$ a $\left\{x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T \in \mathbb{R}^4 \mid x_1 + x_2 = x_3 + x_4 = 0\right\}$,

(f) $\mathbb{R}^4$ a prostor lineárních zobrazení $f\colon \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}$.

Řešení:
Dva vektorové prostory jsou isomorfní právě tehdy, když mají stejnou dimenzi a fungují nad stejným tělesem.

(a) Ano, oba mají dimenzi 4. Není těžké rozmyslet, že isomorfismem je například zobrazení
$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mapsto (a, b, c, d)^T.$$

(b) Ano, oba mají dimenzi 4. Reálný polynom stupně nejvýš tři
$$p(x) = p_0 + p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3$$
můžeme reprezentovat jako uspořádanou čtveřici $(p_0, p_1, p_2, p_3)^T$. Isomorfismem zde je
$$(p_0, p_1, p_2, p_3)^T \mapsto p_0 + p_1 x + p_2 x^2 + p_3 x^3.$$

(c) Ano, isomorfismem bude například transpozice
$$A \mapsto A^T.$$

(d) Ne, prostory nepracují nad stejným tělesem.

(e) Ano, oba mají dimenzi 2. můžeme volit například zobrazení
$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \mapsto (a, -a, b, -b)^T.$$

(f) Ano, vektoru $u \in \mathbb{R}^4$ přiřadíme lineární zobrazení $f(x) = u^T x$. Naopak každé lineární zobrazení $f\colon \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}$ se dá zapsat maticí s jedním řádkem a čtyřmi sloupci (věta z přednášky).

Cv. 13.11 Buď $f\colon U \to V$ isomorfismus a $x_1, \ldots, x_n \in U$. Dokažte, že jsou-li $x_1, \ldots, x_n$ lineárně nezávislé, pak i $f(x_1), \ldots, f(x_n)$ jsou lineárně nezávislé.

Řešení:
Mějme, $\alpha_1, \ldots, \alpha_n$ takové, že $\sum_{i=1}^n \alpha_i f(x_i) = o$. Dostáváme
$$o = \sum_{i=1}^n \alpha_i f(x)_i = f\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i\right).$$

Pro isomorfismus platí, že $f(x) = o$ právě tehdy, když $x = o$. Proto také $\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i = o$. Z lineární nezávislosti $x_1, \ldots, x_n$ dostáváme, že $\alpha_i = 0$ pro všechny i, tedy $f(x_1), \ldots, f(x_n)$ jsou lineárně nezávislé.