

12. VLASTNÍ VEKTORY

Mějme lineární transformaci $f: V \rightarrow V$ a její matici A vzhledem k nějaké bázi. Obraz vektoru v při lineární transformaci f^n můžeme najít pomocí toho, že spočteme jeho souřadnice, a to tak že souřadnice vektoru v vynásobíme maticí A^n , protože to je matice transformace f^n (vše samozřejmě vzhledem ke zvolené bázi). Je tedy žádoucí volit bázi prostoru tak, aby matice transformace byla co nejjednodušší, pokud možno diagonální, protože potom se její mocnina počítá velice jednoduše.

12.1. Definice, příklady

Při lineární transformaci $V \rightarrow V$ se každý vektor z prostoru V zobrazí na některý vektor opět z prostoru V . Může se tedy stát, že vektor se zobrazí na nějaký svůj skalární násobek.

Definice 12.1.1. Buď $f: V \rightarrow V$ lineární transformace vektorového prostoru V nad polem P . Skalár $\lambda \in P$ je *vlastní hodnota* (v případě číselného pole P *vlastní číslo*) transformace f , jestliže existuje nenulový vektor $v \in V$ takový, že

$$f(v) = \lambda v.$$

Je-li λ je vlastní hodnota transformace f , potom každý vektor $v \in V$ takový, že $f(v) = \lambda v$, je *vlastní vektor* transformace f příslušný vlastní hodnotě λ .

Analogicky jsou definovány vlastní vektory a vlastní hodnoty (čísla) čtvercové matice.

Definice 12.1.2. Buď A čtvercová matice řádu n nad polem P . Skalár $\lambda \in P$ je *vlastní hodnota* (*vlastní číslo*) matice A , jestliže existuje nenulový vektor (uspořádaná n -tice, sloupková matice) $x \in P^n$ takový, že

$$Ax = \lambda x.$$

Je-li λ je vlastní hodnota matice A , potom každý vektor $x \in P^n$ takový, že $Ax = \lambda x$, je *vlastní vektor* matice A příslušný vlastní hodnotě λ .

Tedy, aby skalár λ byl vlastní hodnotou lineární transformace nebo čtvercové matice, musí existovat nenulový vektor, který se zobrazí tou lineární transformací, resp. čtvercovou maticí na svůj λ -násobek. V takovém případě i nulový vektor je vlastní vektor příslušný vlastní hodnotě λ .

Příklad. (1) Je-li V netriviální prostor (obsahuje nenulový vektor), pak pro identickou transformaci $\text{id}: V \rightarrow V$, $\text{id}(v) = v$, každý vektor $v \in V$ je vlastní s vlastní hodnotou 1, protože $\text{id}(v) = 1 \cdot v$.

(2) Je-li V netriviální prostor, pak pro nulovou transformaci $0: V \rightarrow V$, $0(v) = 0$, každý vektor $v \in V$ je vlastní s vlastní hodnotou 0, protože $0(v) = 0 \cdot v$.

(3) Je-li V netriviální prostor a c skalár, pak pro transformaci $f_c: V \rightarrow V$, $f_c(v) = cv$, každý vektor $v \in V$ je vlastní s vlastní hodnotou c .

(4) Pro rovnoběžné promítání $E^3 \rightarrow E^3$ podél vektoru $v \neq 0$ na rovinu $U \subset E^3$ procházející počátkem, kde $v \notin U$, vektor v a všechny jeho násobky jsou vlastní vektory s vlastním číslem 0, každý vektor z U je vlastní vektor s vlastním číslem 1 a jiné vlastní vektory tato transformace nemá.

(5) Pro rotaci $E^2 \rightarrow E^2$ o úhel $0 \leq \varphi < 2\pi$:

(a) je-li $\varphi = 0$, pak jde o identickou transformaci a každý vektor je vlastní s vlastním číslem 1;

(b) je-li $\varphi = \pi$, pak jde o středovou symetrii $v \mapsto -v = (-1)v$ a každý vektor je vlastní s vlastním číslem -1 ;

(c) v ostatních případech neexistuje žádný vlastní vektor.

(6) Rotace $E^3 \rightarrow E^3$ o úhel $0 \leq \varphi < 2\pi$ kolem zvolené pevné osy L procházející počátkem. Označme $L^\perp$ rovinu procházející počátkem kolmo k L (tzv. ortogonální doplněk).

(a) Je-li $\varphi = 0$, pak jde o identickou transformaci a každý vektor je vlastní s vlastním číslem 1;

(b) je-li $\varphi = \pi$, pak každý vektor z L je vlastní s vlastním číslem 1, každý vektor z $L^\perp$ je vlastní s vlastním číslem -1 a žádný jiný vlastní vektor tato transformace nemá;

(c) v ostatních případech každý vektor z L je vlastní vektor s vlastním číslem 1 a žádný jiný vlastní vektor neexistuje.

(7) Buď V vektorový prostor všech hladkých funkcí $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (mají spojitě derivace všech řádů) a buď $\delta: V \rightarrow V$, $\delta(f) = f'$ transformace, která funkci f přiřadí její derivaci f' . Z matematické analýzy víme, že pro libovolné $\lambda \in \mathbb{R}$ platí $(e^{\lambda x})' = \lambda e^{\lambda x}$, čili funkce $e^{\lambda x}$ a každý její skalární násobek jsou vlastní vektory transformace δ s vlastním číslem λ .

Buď $f \in V$ libovolná funkce s vlastností $f' = \lambda f$. Potom

$$(f(x)e^{-\lambda x})' = \lambda f(x)e^{-\lambda x} - f(x)\lambda e^{-\lambda x} = 0,$$

čili funkce $f(x)e^{-\lambda x}$ je konstantní. Označíme-li $f(x)e^{-\lambda x} = c$, dostaneme $f(x) = ce^{\lambda x}$, takže každá funkce s vlastností $f' = \lambda f$ je skalární násobek funkce $e^{\lambda x}$. To znamená, že každé reálné číslo λ je vlastní číslo transformace δ a příslušné vlastní vektory jsou všechny skalární násobky funkce $e^{\lambda x}$. $\square$

Cvičení. Určete všechny vlastní vektory následujících lineárních transformací vektorového prostoru $\mathbb{C}$ nad $\mathbb{R}$. Návod: Pomozte si geometrickou interpretací v Gaussově rovině.

(1) Zobrazení $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$, $z \mapsto \bar{z}$, kde $\bar{z}$ je číslo komplexně sdružené k číslu z .

(2) Zobrazení $\text{re}: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$, $z \mapsto \text{re } z = \frac{1}{2}(z + \bar{z})$ (reálná část čísla z). $\square$

12.2. Výpočet vlastních čísel a vlastních vektorů

Tvrzení 12.2.1. Buď $f: V \rightarrow V$ lineární transformace. Potom

(1) skalár λ je vlastní hodnota transformace f právě tehdy, když $f - \lambda \text{id}_V$ není injektivní;

(2) množina všech vlastních vektorů příslušných vlastní hodnotě λ transformace f je podprostor prostoru V .

Důkaz. Buďte $v \in V$ a λ skalár. Následující vztahy jsou ekvivalentní:

$$f(v) = \lambda v$$

$$f(v) - \lambda v = 0$$

$$f(v) - (\lambda \text{id}_V)(v) = 0$$

$$(f - \lambda \text{id}_V)(v) = 0$$

$$v \in \text{Ker}(f - \lambda \text{id}_V)$$

Takže λ je vlastní hodnota právě tehdy, když v $\text{Ker}(f - \lambda \text{id}_V)$ existuje nenulový vektor, což podle Tvzení 11.2.2 je právě tehdy, když $f - \lambda \text{id}_V$ není injektivní.

Z uvedeného navíc vyplývá, že množina všech vlastních vektorů příslušných vlastní hodnotě λ transformace f je $\text{Ker}(f - \lambda \text{id}_V)$, což je podprostor prostoru V . $\square$

Obdobné tvrzení platí i pro vlastní hodnoty a vlastní vektory matice.

Tvrzení 12.2.2. *Buď A matice typu $n \times n$ nad polem P . Potom*

- (1) *skalár λ je vlastní hodnota matice A právě tehdy, když $\det(A - \lambda E_n) = 0$;*
- (2) *množina všech vlastních vektorů příslušných vlastní hodnotě λ matice A je podprostor prostoru P^n .*

Důkaz. Buďte $x \in P^n$ a λ skalár. Následující vztahy jsou ekvivalentní:

$$\begin{aligned} Ax &= \lambda x \\ Ax - \lambda x &= 0 \\ Ax - \lambda E_n x &= 0 \\ (A - \lambda E_n)x &= 0 \\ x &\in \text{Ker}(A - \lambda E_n) \end{aligned}$$

Takže λ je vlastní hodnota právě tehdy, když v $\text{Ker}(A - \lambda E_n)$ existuje nenulový vektor, tedy homogenní soustava $(A - \lambda E_n)x = 0$ má nenulové řešení, a to má právě tehdy, když matice $A - \lambda E_n$ je singulární, čili $\det(A - \lambda E_n) = 0$.

Z uvedeného navíc vyplývá, že množina všech vlastních vektorů příslušných vlastní hodnotě λ matice A je množina všech řešení homogenní soustavy rovnic o n neznámých, což je podprostor prostoru P^n . $\square$

Tvrzení 12.2.3. *Vlastní hodnoty trojúhelníkové matice jsou prvky na diagonále matice.*

Důkaz. Cvičení. $\square$

Tvrzení 12.2.4. *Buď A matice typu $n \times n$ nad polem P . Potom $\det(A - \lambda E_n)$ je polynom neurčité λ stupně n s koeficienty z pole P .*

Důkaz. Cvičení. $\square$

Tvrzení 12.2.5. *Matice typu $n \times n$ má nejvýše n vlastních hodnot.*

Důkaz. Vlastní hodnoty jsou kořeny polynomu $\det(A - \lambda E_n)$ stupně n a polynom stupně n má nejvýše n kořenů. $\square$

Definice 12.2.1. Buď A čtvercová matice. Polynom

$$\chi_A = \det(A - \lambda E)$$

je *charakteristický polynom* matice A a rovnice

$$\det(A - \lambda E) = 0$$

je *charakteristická rovnice* matice A .

Cvičení. Buď $\chi_A = c_n \lambda^n + c_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + c_0$ charakteristický polynom matice A typu $n \times n$. Ukažte, že $c_n = (-1)^n$, $c_{n-1} = (-1)^{n-1} \text{tr } A$ a $c_0 = \det A$. $\square$

Podle Tvzení 12.2.2 je λ vlastní hodnota matice A právě tehdy, když je kořenem příslušného charakteristického polynomu. Vlastní vektory příslušné vlastní hodnotě λ získáme jako řešení soustavy lineárních rovnic $(A - \lambda E)x = 0$.

Pro lineární zobrazení $f: U \rightarrow V$, bázi $u = (u_1, \dots, u_n)$ prostoru U a bázi $v = (v_1, \dots, v_m)$ prostoru V máme definovanu matici zobrazení f vzhledem k bázím u a v .

Jedná-li se o lineární transformaci f , tedy $U = V$, a stejné báze, tedy $u = v$, budeme příslušnou matici stručněji nazývat *matice lineární transformace f vzhledem k bázi v* .

Vlastní hodnoty lineární transformace můžeme hledat jako vlastní hodnoty matice transformace.

Tvrzení 12.2.6. *Budte V konečněrozměrný vektorový prostor nad polem P , $f: V \rightarrow V$ lineární transformace a A matice transformace f vzhledem k nějaké bázi prostoru V . Potom $\lambda \in P$ je vlastní hodnota transformace f právě tehdy, když λ je vlastní hodnota matice A .*

Důkaz. Tvrzení vyplývá z toho, že vektorům z V jsou jednoznačně přiřazeny jejich souřadnice (zobrazení přiřazující vektorům jejich souřadnice je izomorfismus), transformace f je určena svou maticí A a souřadnice obrazu $f(v)$ vektoru v o souřadnicích x jsou rovny součinu matic Ax , vše vzhledem k jedné bázi. $\square$

Vlastní hodnoty lineární transformace f tedy získáváme jako vlastní hodnoty matice A transformace f vzhledem k nějaké bázi, tedy jako kořeny charakteristického polynomu matice A . Při volbě jiné báze dostaneme jinou matici A' transformace f , jejíž vztah k A je $A' = QAQ^{-1}$, kde Q je matice přechodu mezi bázemi. Je otázkou, zda matice A a A' mají stejné charakteristické polynomy a tedy stejné vlastní hodnoty.

Tvrzení 12.2.7. *Podobné matice mají stejné charakteristické polynomy.*

Důkaz. Necht A, B jsou podobné matice, tedy $B = Q^{-1}AQ$. Potom

$$\begin{aligned}\chi_B &= \det(B - \lambda E) = \det(Q^{-1}AQ - \lambda E) = \det(Q^{-1}AQ - Q^{-1}\lambda EQ) = \\ &= \det(Q^{-1}(A - \lambda E)Q) = \det Q^{-1} \cdot \det(A - \lambda E) \cdot \det Q = \\ &= \frac{1}{\det Q} \cdot \det(A - \lambda E) \cdot \det Q = \det(A - \lambda E) = \chi_A.\end{aligned}\quad \square$$

Díky předchozímu tvrzení můžeme pomocí charakteristického polynomu matice definovat charakteristický polynom lineární transformace konečněrozměrného prostoru.

Definice 12.2.2. Buď $f: V \rightarrow V$ lineární transformace konečněrozměrného vektorového prostoru V . *Charakteristický polynom χ_f transformace f je roven charakteristickému polynomu χ_A matice A transformace f vzhledem k libovolné bázi.*

Díky Tvrzení 12.2.7 je předchozí definice korektní a kořeny charakteristického polynomu transformace f jsou všechny vlastní hodnoty transformace f .

Tvrzení 12.2.8. *Lineární transformace n -rozměrného vektorového prostoru má nejvýše n vlastních hodnot.*

Důkaz. Charakteristický polynom je stupně n a má tedy nejvýše n kořenů. $\square$

Definice 12.2.3. Necht f (resp. A) je lineární transformace konečněrozměrného vektorového prostoru (resp. čtvercová matice) a λ je její vlastní hodnota. *Algebraická násobnost vlastní hodnoty λ je její násobnost jako kořene charakteristického polynomu transformace f (resp. matice A).*
Geometrická násobnost vlastní hodnoty λ je dimenze podprostoru vlastních vektorů transformace f (resp. matice A) příslušných vlastní hodnotě λ .

12.3. Diagonalizovatelné transformace

Definice 12.3.1. Lineární transformace konečněrozměrného prostoru je *diagonalizovatelná*, jestliže její matice vzhledem k nějaké bázi je diagonální.

Tvrzení 12.3.1. Buď $f: V \rightarrow V$ lineární transformace konečněrozměrného vektorového prostoru V , $(v_1, \dots, v_n)$ báze prostoru V a A matice transformace f vzhledem k uvedené bázi. Potom

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

právě tehdy, když $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ jsou vlastní hodnoty transformace f a pro každé $i \in \{1, \dots, n\}$ vektor v_i je vlastní vektor příslušný vlastní hodnotě λ_i .

Důkaz. Cvičení. □

Důsledek. Lineární transformace konečněrozměrného prostoru je diagonalizovatelná právě tehdy, když existuje báze prostoru tvořená vlastními vektory transformace.

Definice 12.3.2. Matice je *diagonalizovatelná*, jestliže je podobná diagonální matici.

Tvrzení 12.3.2. Matice A typu $n \times n$ nad polem P je diagonalizovatelná právě tehdy, když existuje báze prostoru P^n tvořená vlastními vektory matice A .

Důkaz. Cvičení. □

Tvrzení 12.3.3. Lineární transformace konečněrozměrného vektorového prostoru je diagonalizovatelná právě tehdy, když její matice vzhledem k libovolné bázi je diagonalizovatelná.

Důkaz. Buď $f: V \rightarrow V$ lineární transformace konečněrozměrného vektorového prostoru V , $(v_1, \dots, v_n)$ báze prostoru V a A matice transformace f vzhledem k uvedené bázi.

Předpokládejme, že transformace f je diagonalizovatelná, tedy že vzhledem k nějaké bázi má diagonální matici B . Potom B je podobná A , tedy A je diagonalizovatelná.

Předpokládejme, že A je diagonalizovatelná, čili je podobná diagonální matici B a existuje tedy regulární matice Q taková, že $B = QAQ^{-1}$. Potom vektory z V , jejichž souřadnice vzhledem k bázi $(v_1, \dots, v_n)$ jsou právě sloupky matice Q , tvoří bázi prostoru V , vzhledem k níž je matice transformace f právě diagonální matice B . Tedy, f je diagonalizovatelná transformace. □

Tvrzení 12.3.4. Buďte $v_1, \dots, v_n$ nenulové vlastní vektory příslušné po řadě různým vlastním hodnotám $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ lineární transformace $f: V \rightarrow V$. Potom $\{v_1, \dots, v_n\}$ je lineárně nezávislá množina.

Důkaz. Tvrzení dokážeme matematickou indukcí podle n . Pro $n = 1$ tvrzení platí, protože $v_1 \neq 0$. Buď $n > 1$ a předpokládejme, že tvrzení platí pro $n - 1$, tedy že množina $\{v_1, \dots, v_{n-1}\}$ je lineárně nezávislá. Buďte $x^1, \dots, x^{n-1}, x^n$ skaláry takové, že

$$x^1 v_1 + \dots + x^{n-1} v_{n-1} + x^n v_n = 0. \quad (11)$$

Zobrazíme-li levou stranu v (11) lineární transformací $f - \lambda_n \text{id}_V$, dostaneme

$$\begin{aligned} (f - \lambda_n \text{id}_V)(x^1 v_1 + \dots + x^{n-1} v_{n-1} + x^n v_n) &= \\ &= x^1 (f - \lambda_n \text{id}_V)(v_1) + \dots + x^{n-1} (f - \lambda_n \text{id}_V)(v_{n-1}) + x^n (f - \lambda_n \text{id}_V)(v_n) = \\ &= x^1 (\lambda_1 - \lambda_n) v_1 + \dots + x^{n-1} (\lambda_{n-1} - \lambda_n) v_{n-1} + x^n (\lambda_n - \lambda_n) v_n = \\ &= x^1 (\lambda_1 - \lambda_n) v_1 + \dots + x^{n-1} (\lambda_{n-1} - \lambda_n) v_{n-1}. \end{aligned}$$

Zobrazíme-li pravou stranu v (11) lineární transformací $f - \lambda_n \text{id}_V$, dostaneme

$$(f - \lambda_n \text{id}_V)(0) = 0.$$

Čili

$$x^1(\lambda_1 - \lambda_n)v_1 + \cdots + x^{n-1}(\lambda_{n-1} - \lambda_n)v_{n-1} = 0.$$

Podle indukčního předpokladu množina $\{v_1, \dots, v_{n-1}\}$ je lineárně nezávislá, takže

$$x^1(\lambda_1 - \lambda_n) = \cdots = x^{n-1}(\lambda_{n-1} - \lambda_n) = 0.$$

Jelikož vlastní hodnoty $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ jsou navzájem různé, tedy $\lambda_i - \lambda_n \neq 0$ pro všechna $i \in \{1, \dots, n-1\}$, dostáváme

$$x^1 = \cdots = x^{n-1} = 0.$$

Po dosazení do (11) dostaneme $x^n v_n = 0$ a tedy také $x^n = 0$, protože v_n je nenulový vektor. Takže množina $\{v_1, \dots, v_n\}$ je lineárně nezávislá. $\square$

Důsledek. *Má-li lineární transformace n -rozměrného prostoru n vlastních hodnot, je diagonalizovatelná.*

Důkaz. Jsou-li $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ navzájem různé vlastní hodnoty transformace $f: V \rightarrow V$, potom pro každé $i \in \{1, \dots, n\}$ existuje nenulový vlastní vektor v_i příslušný λ_i . Množina $\{v_1, \dots, v_n\}$ je lineárně nezávislá a tvoří tedy bázi prostoru V . Matice transformace f vzhledem k bázi tvořené vlastními vektory je diagonální, takže f je diagonalizovatelná transformace. $\square$

Důsledek. *Má-li matice typu $n \times n$ n vlastních hodnot, je diagonalizovatelná.*

Příklad. Mějme $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $f(x^1, x^2) = (2x^1 + x^2, 3x^1 + 4x^2)$ (ověřte, že f je lineární) a na $\mathbb{R}^2$ uvažujme kanonickou bázi.

Matici zobrazení získáme tak, že do sloupků budeme psát souřadnice obrazů vektorů báze (v tomto případě souřadnice jsou stejné jako vektory).

Obrazy báze jsou $f(1, 0) = (2, 3)$, $f(0, 1) = (1, 4)$, takže matice zobrazení f je

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

Charakteristický polynom je

$$\begin{vmatrix} 2 - \lambda & 1 \\ 3 & 4 - \lambda \end{vmatrix} = (\lambda - 1)(\lambda - 5)$$

a jeho kořeny, tedy vlastní čísla jsou $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 5$, obě s algebraickou násobností 1.

Podle předchozích tvrzení je matice A podobná matici

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

Vlastní vektory získáme jako řešení soustavy lineárních rovnic $(A - \lambda E)x = 0$ pro jednotlivé vlastní hodnoty.

Pro $\lambda_1 = 1$ řešíme soustavu

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 3 & 3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{tedy} \quad \begin{matrix} 1x^1 + 1x^2 = 0 \\ 3x^1 + 3x^2 = 0 \end{matrix}.$$

Množina všech řešení této soustavy je $\llbracket(1, -1)\rrbracket$ a příslušné vlastní vektory jsou tedy všechny skalární násobky vektoru $v_1 = (1, -1)$. Vektor v_1 se skutečně zobrazí na svůj 1-násobek, $f(1, -1) = (1, -1)$. Geometrická násobnost vlastního čísla $\lambda_1 = 1$ je tedy 1.

Pro $\lambda_2 = 5$ řešíme soustavu

$$\begin{pmatrix} -3 & 1 \\ 3 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{tedy} \quad \begin{matrix} -3x^1 + 1x^2 = 0 \\ 3x^1 - 1x^2 = 0 \end{matrix}.$$

Množina všech řešení této soustavy je $\llbracket(1, 3)\rrbracket$ a příslušné vlastní vektory jsou tedy všechny skalární násobky vektoru $v_2 = (1, 3)$. Vektor v_2 se skutečně zobrazí na svůj 5-násobek, $f(1, 3) = (5, 15)$. Geometrická násobnost vlastního čísla $\lambda_2 = 5$ je tedy také 1.

Podle Tvzení 12.3.4 vektory v_1, v_2 tvoří „novou“ bázi prostoru $\mathbb{R}^2$.

Matice přechodu Q od kanonické báze k nové bázi (ve sloupcích jsou nové souřadnice vektorů kanonické báze) a matice k ní inverzní Q^{-1} , tedy matice přechodu od nové báze ke kanonické bázi (ve sloupcích jsou kanonické souřadnice vektorů nové báze) jsou

$$Q = \begin{pmatrix} 3/4 & -1/4 \\ 1/4 & 1/4 \end{pmatrix} \quad \text{a} \quad Q^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix}.$$

A skutečně

$$A' = Q \cdot A \cdot Q^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix}.$$

Poznámka. Při hledání vlastních vektorů tedy hledáme jádra lineárních transformací $f - \lambda \cdot \text{id}$ pro jednotlivé hodnoty λ .

Pro $\lambda_1 = 1$ je $(f - \text{id})(x^1, x^2) = (x^1 + x^2, 3x^1 + 3x^2)$ a jádro tohoto zobrazení je

$$\text{Ker}(f - \text{id}) = \llbracket(1, -1)\rrbracket.$$

Pro $\lambda_2 = 5$ je $(f - 5 \text{id})(x^1, x^2) = (-3x^1 + x^2, 3x^1 - x^2)$ a jádro tohoto zobrazení je

$$\text{Ker}(f - 5 \text{id}) = \llbracket(1, 3)\rrbracket. \quad \square$$

Příklad. Mějme $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $f(x^1, x^2) = (2x^1 + x^2, 2x^2)$ (ověřte, že f je lineární) a na $\mathbb{R}^2$ uvažujme kanonickou bázi.

Matici zobrazení získáme tak, že do sloupků budeme psát souřadnice obrazů vektorů báze (v tomto případě souřadnice jsou stejné jako vektory).

Obrazy báze jsou $f(1, 0) = (2, 0)$, $f(0, 1) = (1, 2)$, takže matice zobrazení f je

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

Charakteristický polynom je

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

a jeho dvojnásobný kořen, tedy vlastní číslo je $\lambda = 2$, s algebraickou násobností 2.

Vlastní vektory, přesněji jejich souřadnice, které jsou však v tomto případě stejné jako vektory, získáme jako řešení soustavy lineárních rovnic $(A - 2E)x = 0$.

Řešíme soustavu

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{tedy} \quad \begin{matrix} 0x^1 + 1x^2 = 0 \\ 0x^1 + 0x^2 = 0 \end{matrix}.$$

Množina všech řešení této soustavy je $\llbracket(1, 0)\rrbracket$ a příslušné vlastní vektory jsou tedy všechny skalární násobky vektoru $v = (1, 0)$. Vektor v se skutečně zobrazí na svůj 2-násobek, $f(1, 0) = (2, 0)$. Geometrická násobnost vlastního čísla $\lambda = 2$ je tedy 1.

Jinak formulováno, opět, při hledání vlastních vektorů tedy hledáme jádro lineární transformace $f - 2 \cdot \text{id}$, $(f - 2 \cdot \text{id})(x^1, x^2) = (x^2, 0)$ a jádro tohoto zobrazení je

$$\text{Ker}(f - 2 \cdot \text{id}) = \llbracket(1, 0)\rrbracket.$$

Z vlastních vektorů tedy nelze sestavit bázi prostoru $\mathbb{R}^2$ a podle Důsledku Tvzení 12.3.1 transformace f není diagonalizovatelná. $\square$