Organizační úvod

Úvod

Poznámka (Motivace)
Hledání řešení diferenciálních rovnic. (Např. nahradíme rovnici definicí operátoru a hledáme, kde je operátor identita. Tedy neřešíme rovnice, ale prostory, na kterých máme funkce.)

Definice 0.1

$$\mathbb{K} = \mathbb{C} \vee \mathbb{K} = \mathbb{R}.$$

1 Banachovy a Hilbertovy prostory

Definice 1.1 (Normovaný lineární prostor)

Nechť X je vektorový prostor nad $\mathbb{K}$. Funkci $||\cdot|| : X \to [0, \infty)$ nazveme normou na X, pokud

$$||x\,|| = 0 \Leftrightarrow x = \mathbf{o},$$

$$||x + y|| \leq ||x|| + ||y||,$$

$$||\alpha \cdot x|| = |\alpha| \cdot ||x\;||.$$

Tvrzení 1.1

Nechť $(X, ||\;\cdot||)$ je normovaný lineární prostor nad $\mathbb{K}$.

Funkce $\varrho(x, y) = ||x - y||$ je translačně invariantní metrika na X.

Norma je 1-lipschitzovská (a tedy spojitá) funkce na x.

Zobrazení $+ : X \times X \to X$ a $\cdot : \mathbb{K} \times X \to X$ jsou spojitá.

Důkaz
První část byla na MA3. Druhá: Zvol $x, y \in X$. Pak $||y||, ||x|| \leq ||x|| + ||x - y||$, tudíž $|||x|| - ||y||| \leq ||x - y||$.

Třetí část: Připomenutí: Součin metrických prostorů s maximovou metrikou je metrický prostor. Důkaz tohoto i třetí části je pak jednoduché cvičení. □

Definice 1.2 (Uzavřená a otevřená koule)

$$B_X(x,r) = \{y \in X | ||x-y|| \leq r\}.$$
$$U_X(x,r) = \{y \in X | ||x-y|| < r\}.$$
$$S_X(x,r) = \{y \in X | ||x-y|| = r\}.$$

$$B_X = B(0,1)$$
$$U_X = U(0,1)$$
$$S_X = S(0,1)$$

Definice 1.3 (Banachův prostor)

Banachův prostor je normovaný lineární prostor, který je úplný v metrice dané normou.

Dále se opakovaly metrické prostory. Úplnost, kompaktnost a Bairova věta.

Tvrzení 1.2

Nechť X je normovaný lineární prostor a Y jeho podprostor. Potom a) Je-li Y Banachův, pak je Y uzavřený v X. Pokud je naopak X Banachův, pak Y je Banachův právě tehdy, když je uzavřený.

Důkaz

Je-li (P, ϱ) úplný, pak $M \subseteq P$ je úplný $\Leftrightarrow$ M je uzavřený. To dává speciálně b).

(P, ϱ) je MP, pak $M \subseteq P$ je úplný $\implies$ M uzavřený. To dává speciálně a). □

Například

$(\mathbb{K}, ||\cdot||_p)$, $L_p(\Omega, \mathcal{A}, \mu, \mathbb{K})$, kde funkce je $\Omega \to \mathbb{K}$ a norma je definována jako p-tá odmocnina z integrálu funkce na p. $l_p(l)$ resp. $l_p(l, \mathbb{K})$ je diskrétní verze předchozího (tj. se sumou). $\mathbb{C}(K)$, kde K je hausdorfův a kompaktní TP.

c jsou všechny posloupnosti se supremovou normou, c_0 jsou všechny posloupnosti konvergující k 0 se supremovou normou. c_{00} sestává z těch posloupností, kde je jen konečně mnoho nenulových prvků (norma je maximová), je to lineární prostor, ale není Banachův. $c_0(I)$ je zobecnění z $c_0(\mathbb{N})$ na libovolnou diskrétní množinu I, tj. obsahuje „posloupnosti“, kde pro každé ε je pouze konečně mnoho členů větších než ε (pak $(c_0(I), ||\cdot||_\infty)$ je Banachův).

$\mathcal{L}^1([0,1], ||\cdot||_{\mathcal{L}^1})$ (prostor hladkých funkcí na intervalu $[0,1]$), kde $||f||_{\mathcal{L}^1} = ||f||_\infty + ||f'||_\infty$. $\mathcal{M}(K) = \{\mu : Borel(K) \to \mathbb{K} | \mu$ regulární míra$\}$, $||\mu|| := \sup\{\sum_{i=1}^{\infty} |\mu(B_i)|, \bigcup B_i = K, B_i$ Borelo

Věta 1.3

Na konečněrozměrném vektorovém prostoru jsou všechny normy ekvivalentní.

Důkaz

Později. $\square$

Lemma 1.4

Nechť X je vektorový prostor, $||\cdot||_1$ a $||\cdot||_2$ jsou normy na X, $B_1 = B_{X,||\cdot||_1}$, $B_2 = B_{X,||\cdot||_2}$ a $a, b > 0$. Pak $a||x||^2 \leq ||x||_1 \leq b||x||_2$ pro každé $x \in X$, právě když $aB_1 \subset B_2 \subset bB_1$. Speciálně $||\cdot||_1 = ||\cdot||_2$ právě tehdy, když $B_1 = B_2$.

Důkaz

$\implies$: Zvol $x \in aB_1$, pak $||\frac{x}{a}||_1 \leq 1 \implies x \in B_2$. Opačně: Zvol $x \in B_2$, pak $||x||_2 \leq 1 \implies x \in B_1$.

$\Leftarrow$: Pokud $x = 0$, pak jsou nerovnosti jasné. Zvol $x \neq 0$. Pak $\frac{x}{||x||_1} \in B_1$. Pak $\frac{ax}{||x||_1} \in B_1 \subseteq B_2 \implies a||x||_2 \leq ||x||_1$. Analogicky pro druhý směr. $\square$

Tvrzení 1.5

Nechť X je vektorový prostor a $||\cdot||_1$ a $||\cdot||_2$ jsou normy na X a B_1 a B_2 jako minule. Následující tvrzení jsou ekvivalentní:

1. *Normy $||\cdot||_1$ a $||\cdot||_2$ jsou ekvivalentní.*
2. *Existují $a, b > 0$ taková, že $aB_1 \subset B_2 \subset bB_1$.*
3. *Zobrazení $\mathrm{id} : (X, ||\cdot||_1) \to (X, ||\cdot||_2)$ je homeomorfismus.*
4. *Otevřené množiny v $(X, ||\cdot||_1)$ X splývají s otevřenými množinami $(X, ||\cdot||_2)$.*
5. *$||x_n - x||_1 \to 0$, právě když $||x_n - x||_2 \to 0$ pro $\{x_n\} \subset X$, $x \in X$.*

Důkaz

$1 \Leftrightarrow 2$ plyne z předchozího lemmatu. $3 \Leftrightarrow 4 \Leftrightarrow 5$ je lehké a platí ve všech MP. $1 \implies 5$ jasné.

$5 \implies 1$: Sporem posloupností jdoucí k 1. TODO $\square$

Definice 1.4

Nechť X je vektorový prostor. Řekneme, že množina $M \subset X$ je konvexní, pokud pro každé $x, y \in M$ a $\lambda \in [0, 1]$ platí, že $\lambda x + (1 - \lambda)y \in M$.

Poznámka (Fakt)
Koule v normovaném lineárním prostoru jsou konvexní množiny. (A naopak každá konvexní množina může být koulí v nějaké normě.)

Definice 1.5 (Konvexní obal)

Nechť X je vektorový prostor a $M \subset X$. Konvexním obalem M nazveme množinu $\operatorname{conv} M = \bigcap \{C \supset M | C \subset X \text{ je konvexní}\}$.

Tvrzení 1.6

Nechť X je vektorový prostor a $M \subset X$. Pak

$$\operatorname{conv} M = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \lambda_i x_i | x_i \in M, \lambda_i \geq 0, \sum \lambda = 1, n \in \mathbb{N} \right\}.$$

Důkaz
$\subseteq$: Stačí dokázat, že množina vpravo je konvexní. Přímočaré.

$\supseteq$: Stačí dokázat, že každý prvek vlevo je v konvexním obalu. Indukcí podle n, přímočaré. □

Definice 1.6

Nechť X je vektorový prostor. Řekneme, že množina $M \subset X$ je symetrická, pokud $-M = M$.

Poznámka (Fakt)
Nechť M je symetrická konvexní podmnožina normovaného lineárního prostoru X, která obsahuje $U(x, r)$ respektive $B(x, r)$ pro nějaké $x \in X$ a $r \geq 0$. Pak $U(0, r) \subset M$, resp. $B(0, r) \subset M$.

Důkaz
Jednoduchý. □

Definice 1.7

Nechť X je normovaný lineární prostor a $M \subset X$. Pak definujeme uzavřený lineární obal M jako

$$\overline{\operatorname{span}} M = \bigcap \{Y \supset M | Y \text{ uzavřený podprostor } X\}$$

a uzavřený konvexní obal jako $\overline{\operatorname{conv}} M = \bigcap \{TODO\}$.

Poznámka (Fakt)
Nechť X je normovaný lineární prostor, Y je podprostor X a $C \subset X$ je konvexní. Pak $\overline{Y}$ je podprostor X a $\overline{C}$ je konvexní množina.

Poznámka (Fakt)
Nechť X je normovaný lineární prostor a $M \subset X$. Pak $\overline{\operatorname{span} M} = \overline{\operatorname{span} \overline{M}}$ a $\overline{\operatorname{conv} M} = \overline{\operatorname{conv} \overline{M}}$.

Věta 1.7

Nechť X je normovaný lineární prostor, $Y \subset X$ uzavřený podprostor a $Z \subset X$ konečněrozměrný podprostor. Pak $\operatorname{span}(Y \cup Z)$ *je uzavřený.*

Důkaz
Stačí dokázat pro $\dim Z = 1$ (pak indukcí). Ať $Z = \operatorname{span}(e)$, $e \notin Y$. Ověřme, že $\operatorname{span}(Y \cup \{e\}) = \{y + ke | k \in \mathbb{K}\}$ je uzavřený: Ať $x_n = y_n + k_n e \to x \in X$. Chci $x \in \operatorname{span} Y$.

1. krok: (t_n) je omezená. (Kdyby ne, pak má limitu nekonečno.) Pak ale $|| \frac{y_{n_k}}{t_{n_k}} + e \, || = \frac{1}{|t_{n_k}|} || x_{n_k} || \to 0$, tedy $\frac{y_{n_k}}{t_{n_k}} \to -e \notin Y$, tedy Y není uzavřená. ↯

Tedy existuje posloupnost (n_k), že $t_{n_k} \to t \in \mathbb{K}$. Pak ale $y_{n_k} = x_{n_k} - t_{n_k} e \to x - te \in Y$. Tedy $\exists z \in Y : x - te = z$, tj. $x = z + te \in \operatorname{span}(Y \cup \{e\})$. □

Důsledek
Nechť X je normovaný lineární prostor. Každý konečněrozměrný podprostor X je uzavřený v X.

TODO

Věta 1.8 (Test úplnosti)

Nechť X je normovaný lineární prostor. Pak X je Banachův, právě když každá absolutně konvergentní řada je konvergentní.

Důkaz

$\Longrightarrow$: Ať X je Borelovský, $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ je AK řada. $s_N = \sum_{n=1}^{N} x_n$. Chceme (s_n) je cauchy: Buď $\varepsilon > 0$. Ať $n_0 \in \mathbb{N}$ je takové, že $\sum_{n=N}^{M} ||x_n|| < \varepsilon$, $n_0 \leq N < M$. Pak ale pro $n_0 \leq N < M$ je

$$||s_N - s_M|| = || \sum_{n=N+1}^{M} x_n|| \leq \sum_{N+1}^{M} ||x_N|| < \varepsilon.$$

Tedy (s_n) je konvergentní.

$\Leftarrow$: Ať (x_n) je cauchyovská. Indukcí najdeme podposloupnost, že $||x_{n_k} - x_{n_{k+1}} < 2^{-k}$, $k \in \mathbb{N}$. Pak

$$z = \sum_{k=1}^{\infty} (x_{n_{k+1}} - x_{n_k}) = \lim_{k \to \infty} (x_{n_{k+1}} - x_{n_1})$$

$$\Longrightarrow \lim_{k \to \infty} x_{n_k} = \lim_{k \to \infty} (x_{n_k} - x_{n_1} + x_{n+1}) = \lim (x_{n_k} - x_{n_1}) + \lim x_{n_1} = z + x_{n_1}.$$

Celkem $\exists (n_k) \nearrow$, že $\lim(x_{n_k})$ existuje. Značme $x = lim_{k \to \infty} x_{n_k}$. Chceme $\lim_{n \to \infty} x_n = x$. V metrickém prostoru konverguje Cauchyovská posloupnost právě tehdy, pokud existuje její konvergentní podposloupnost. □

Definice 1.8 (Zobecněná řada)

Nechť X je normovaný lineární prostor, Γ je množina a $\{x_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ je kolekce prvků prostoru X. Symbol $\sum_{\gamma \in \Gamma} x_\gamma$ nazveme zobecněnou řadou.

Dále $\mathcal{F}(\Gamma)$ značí systém všech konečných podmnožin Γ. Řekneme, že zobecněná řada ... konverguje (též konverguje bezpodmínečně) k $x \in X$, pokud platí

$$\forall \varepsilon > 0 \; \exists F \in \mathcal{F}(\Gamma) \; \forall F' \in \mathcal{F}(\Gamma), F' \subseteq F : ||x - \sum_{\gamma \in F'} x_\gamma|| < \varepsilon.$$

Existuje-li $x \in X$, říkáme, že je zobecněná řada ... (bezpodmínečně) konvergentn a x nazýváme jejím součtem. Konverguje-li zobecněná řada reálných čísel $\sum_{\gamma \in \Gamma} ||x_\gamma||$, pak se zobecněná řada $\sum_{\gamma \in \Gamma} x_\gamma$ nazývá absolutně konvergentní.

Definice 1.9 (Bolzanova-Cauchyova podmínka)

Řekneme, že zobecněná řada TODO

Věta 1.9 (Nutná podmínka konvergence)

Nechť $\sum_{\gamma \in \Gamma} x_\gamma$ je konvergentní zobecněná řada v normovaném lineárním prostoru X. Pak je její součet určen jednoznačně a $(||x_\gamma||)_{\gamma \in \Gamma} \in c_0(\Gamma)$.

Důkaz (Jednoznačnost)
Ať $\sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma = x \neq y = \sum_{\gamma\in\Gamma} = \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma$. Pak $\forall \varepsilon > 0$:

$$\exists F_x \in \mathcal{F}(\Gamma)\ \forall F \supseteq F_x : ||x - \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma|| < \frac{\varepsilon}{2},$$

$$\exists F_y \in \mathcal{F}(\Gamma)\ \forall F \supseteq F_y : ||x - \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma|| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Pak pro $\varepsilon = ||x-y|| \leq ||x - \sum_{F_x\cup F_y} x_\gamma|| +\ ||\sum_{F_x\cup F_y} x_\gamma - y|| < \varepsilon$. ↯ □

Důkaz (Existence)
Chceme $(||x_\gamma||) \in c_0(\Gamma)$: Ať $\varepsilon > 0$ libovolné. Najdeme

$$F \in \mathcal{F}(\Gamma)\ \forall F' \supset F : ||x - \sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Pak pro $\gamma_0 \notin F$ máme

$$||x_{\gamma_0}|| = ||\sum_{\gamma\in F\cup\{\gamma_0\}} x_\gamma - x + x - \sum_{\gamma\in F} x_\gamma|| \leq ||\ldots|| + ||\ldots|| < \varepsilon.$$

Tedy $\{\gamma\in\Gamma | ||x_\gamma|| > \varepsilon\} \subseteq F \in \mathcal{F}(\Gamma) \implies (||x_\gamma||) \in c_0(\Gamma)$. (Je tam pouze konečný počet prvků větších než ε.) □

Věta 1.10

Nechť X je Banachův prostor.

1. *Zobecněná řada v X je konvergentní právě tehdy, když splňuje Bolzanovu-Cauchyovu podmínku.*
2. *Každá absolutně konvergentní zobecněná řada v X je konvergentní.*
3. *Je-li zobecněná řada $\sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma$ v X konvergentní a $\Lambda \subset \Gamma$, pak je i zobecněná řada $\sum_{\gamma\in\Lambda} x_\gamma$ konvergentní.*

Důkaz (1.)
$\implies$: Ať $\sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma$ je konvergentní. Zvol $\varepsilon > 0$. Zvolíme

$$F \in \mathcal{F}(\Gamma)\ \forall F' \supseteq F : ||\sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma - \sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Pak pro $\tilde{F} \in \mathcal{F}(\Gamma)$, že $\tilde{F} \cap F = \emptyset$ máme:

$$||\sum_{\gamma\in\tilde{F}} x_\gamma|| = ||\sum_{\gamma\in F\cup\tilde{F}} x_\gamma - \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma + \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma - \sum_{\gamma\in F} x_\gamma|| \leq ||\ldots|| + ||\ldots|| < \varepsilon.$$

$\Leftarrow$: Ať $\sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma$ splňuje B-C podmínku. Pak najdeme posloupnost $(F_n)_{n=1}^{\infty} \in \mathcal{F}(\Gamma)^{\mathbb{N}}$, že

$$F_1 \subset F_2 \subset \ldots \wedge \forall F' \mathcal{F}(\Gamma) : F' \cap F_n = \emptyset : ||\sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| < \frac{1}{n}.$$

Označ $y_n = \sum_{\gamma\in F_n} x_\gamma$. 1. krok: (y_n) je cauchyovská. (Dokáže se snadno.) 2. krok: Tedy existuje $y \in X : \lim y_n = y$. Chceme $y = \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma$: Ať $\varepsilon > 0$.

$$\forall F' \supset F : ||y - \sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| \leq ||y_{n_0} - \sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| + ||y_{n_0} - y|| = \sum_{\gamma\in F'\setminus F_{n_0}} x_\gamma \leq \frac{1}{n_0} + ||y_{n_0} - y|| < \varepsilon.$$

□

Důkaz (2.)
Víme, že $\sum_{\gamma\in\Gamma} ||x_\gamma||$ je konvergentní. Dle tvrzení níže tedy

$$\sum_{\gamma\in\Gamma} ||x_\gamma|| = S = \sup\left\{\sum_{\gamma\in\Gamma} |||x_\gamma|||\ F \in \mathcal{F}(\Gamma)\right\}.$$

Ověříme, že $\sum x_\gamma$ splní B-C podmínku: Ať $\varepsilon > 0$. Ať $F \in \mathcal{F}(\Gamma)$ tak, že $S - \varepsilon < \sum_{\gamma\in F} ||x_\gamma||$. Pak $\forall F' \in \mathcal{F}(\Gamma)$, že $F' \cap F = \emptyset$:

$$||\sum_{\gamma\in F'} x_\gamma|| \leq \sum_{\gamma\in F'} ||x_\gamma|| = \sum_{\gamma\in F'\cup F} ||x_\gamma|| - \sum_{\gamma\in F} ||x_\gamma|| < \varepsilon.$$

□

Důkaz (3.)
Snadný důsledek 1., protože B-C podmínka se zjevně dědí na podmnožiny. □

Tvrzení 1.11

Nechť $\sum_{\gamma\in\Gamma} a_\gamma$ je zobecněná řada nezáporných čísel. Pak tato řada konverguje, právě když $\sup\left\{\sum_{\gamma\in F} a_\gamma : F \in \mathcal{F}(\Gamma)\right\} < +\infty$. A navíc platí $\sum_{\gamma\in\Gamma} a_\gamma = \sup\left\{\sum_{\gamma\in F} a_\gamma : F \in \mathcal{F}(\Gamma)\right\}$.

Důkaz

$\implies$: Ať $\sum_{\gamma \in \Gamma} a_\gamma$ konverguje. Pak zvolíme $F \in \mathcal{F}(\Gamma)$ $\forall F' \supset F : || \sum_{\gamma \in \Gamma} a_\gamma - \sum_{\gamma \in F} a_\gamma|| < 1$. Pak $\forall H \in \mathcal{F}(\Gamma) : \sum_{\gamma \in H} a_\gamma \leq \sum_{\gamma \in H \cup F} a_\gamma \leq \sum_{\gamma \in \Gamma} a_\gamma + 1$. Tedy $\sup \ldots \leq \sum_{\gamma \in \Gamma} a_p + 1 < \infty$.

$\Leftarrow$: Ať $S := \sup \ldots < \infty$. Chceme $\sum_{\gamma \in \Gamma} a_\gamma = S$. Ať $\varepsilon > 0$. Ať $H \in \mathcal{F}(\Gamma)$ (z definice suprema) taková, že $S - \varepsilon < \sum_{\gamma \in H} a_\gamma$. Pak pro $F' \supset H$ máme

$$|S - \sum_{\gamma \in F'} a_\gamma| = S - \sum_{\gamma \in F'} a_\gamma < S - \sum_{\gamma \in H} a_\gamma < \varepsilon.$$

Tedy $\sum a_\gamma = S$. $\square$

Tvrzení 1.12

Nechť X je normovaný lineární prostor a $\{x_n\} \subset X$. Pak zobecněná řada $\sum_{n \in \mathbb{N}} x_n$ je absolutně konvergentní, právě když řada $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ je konvergentní.

Důkaz

$\implies$: Ať $\sum_{n=1}^{\infty} ||x_n|| =: S < \infty$. Pak

$$\sup_{F \in \mathbb{F}(\mathbb{N})} \sum_{n \in F} ||x_n|| \leq \sup_{N \in \mathbb{N}} \sum_{n=1}^{N} ||x_n|| = \sum_{n=1}^{\infty} ||x_n|| = S < \infty,$$

neboť každá konečná množina v přirozených číslech má maximum (a odebráním kladných prvků sumu zmenšíme).

$\Leftarrow$: Ať $\sum_{n \in \mathbb{N}} ||x_n||$ je konvergentní, pak dle předchozího tvrzení $S := \sup_{F \in \mathcal{F}(\mathbb{N})} \sum_{n \in F} ||x_n|| < \infty$. Tedy

$$\sum_{n=1}^{\infty} ||x_n|| = \sup_{N \in \mathbb{N}} \sum_{n \in [N]} ||x_n|| \leq S < \infty.$$

$\square$

Věta 1.13

Nechť $\{x_n\}$ je posloupnost v Banachově (pro normovaný lineární prostor je důkaz složitější) prostoru X. Pak následující tvrzení jsou konvergentní:

1. *$\sum_{n \in \mathbb{N}} x_n$ konverguje (říkáme $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ konverguje bezpodmínečně).*
2. *$\sum_{n=1}^{\infty} x_{\pi(n)}$ konverguje pro každou permutaci $\pi : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ ke stejnému součtu.*
3. *$\sum_{n=1}^{\infty} x_{\pi(n)}$ konverguje pro každou permutaci $\pi : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$.*

Důkaz
$1 \implies 2$: Ať $\varepsilon > 0$ a $\pi \in \mathbb{S}(\mathbb{N})$. Ať $F \in \mathcal{F}(\mathbb{N})$ splňuje, že $\forall F' \supseteq F : ||\sum_{n\in F'} x_n - x|| < \varepsilon$, kde $x = \sum_{n\in\mathbb{N}} x_n$. Zvolme $n_0 \in \mathbb{N} : F \subseteq \{\pi(1), \dots, \pi(n_0)\}$. Pak $\forall n \geq n_0 :\ ||\sum_{i=1}^{n} x_{\pi(i)} - x|| < \varepsilon$. Tedy $\sum_{n=1}^{\infty} x_{\pi(n)} = x$.

$2 \implies 3$: okamžitě. $3 \implies 1$: Pro spor předpokládejme, že $\sum_{n=1}^{\infty} x_{\pi(n)}$ konverguje pro každou $\pi \in \mathbb{S}(\mathbb{N})$, ale $\sum_{n\in\mathbb{N}} x_n$ nesplňuje B-C podmínku. Zvolme $\varepsilon > 0$ svědčící o tom, že B-C podmínka není splněna. Pak existuje $(F_n)_{n=1}^{\infty} \in \mathcal{F}(\mathbb{N})^{\mathbb{N}}$, že $F_n \cap F_m = \emptyset\ \forall n \neq m$, $\max F_n < \min F_{n+1}, n \in \mathbb{N}$ a $||\sum_{i\in F_n} x_i||$.

Zvolme $\pi \in \mathbb{S}(\mathbb{N})$ splňující, že existuje $(n_k) \nearrow$ a $(p_k)_{k=1}^{\infty} \in \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$, že $\pi(\{n_k, n_k+1, \dots, n_k+p_k\}) = F_k\ \forall k \in \mathbb{N}$. Tedy $\forall k \in \mathbb{N} : ||\sum_{i=n_k}^{n_k+p_k} x_{\pi(i)}|| = ||\sum_{i\in F_k} x_i|| \geq \varepsilon$. To však znamená, že $\sum_{i=1}^{\infty} x_{\pi(i)}$ nesplňuje B-C podmínku, tedy není konvergentní. ↯ □

Věta 1.14

Každá absolutně konvergentní řada v Banachově prostoru je bezpodmínečně konvergentní.

Důkaz
Jasný z minulé věty. □

Navíc v $\mathbb{R}$ platí ekvivalence.

Věta 1.15

Pokud $\dim X = +\infty$, *pak* $\exists (x_n) : \sum_{n=1}^{\infty} ||x_n||$ *konverguje, ale* $\sum_{n\in\mathbb{N}} x_n$ *není konvergentní.*

2 Lineární operátory a funkcionály

Poznámka (Opakovali jsme)
Lineární zobrazení (viz lingebra), dále:

Věta 2.1

Nechť X, Y jsou normované lineární prostory a $T : X \to Y$ je lineární zobrazení. Pak následující tvrzení jsou ekvivalentní:

1. *T je spojité.*
2. *T je spojité v jednom bodě.*
3. *T je spojité v 0.*
4. *$\exists C \geq 0$ tak, že $||T(x)|| \leq C||x||\ \forall x \in X$.*
5. *T je Lipschitzovské.*
6. *T je stejnoměrně spojité.*
7. *$T(A)$ je omezená pro každou omezenou $A \subset X$.*
8. *$T(B_X)$ je omezená.*
9. *$T(U(0, \delta))$ je omezená pro nějaké $\delta > 0$.*

Prostor $\mathcal{L}(X < Y)$ s normou $||T|| = \sup_{x \in B_x} ||T(x)||$ je normovaný lineární prostor.

Lemma 2.2

Nechť X, Y jsou normované lineární prostory a $T \in \mathcal{L}(X, Y)$.

- $||T(x)|| \leq ||T|| \cdot ||x||$ *pro každé* $x \in X$.
- $||T|| = \sup_{x \in S_X} ||T(x)|| = \sup_{x \in X \setminus \{\mathbf{o}\}} \frac{||T(x)||}{||x||} = \sup_{x \in U_X} ||T(x)||$.
- $||T|| = \inf\{C \geq 0|\ ||T(x)|| \leq C||x|| \forall x \in X\}$.

Důkaz
Pro $x \in X \setminus \{\mathbf{o}\}$ platí $||T(x)|| = ||T(\frac{x}{||x||})|| \cdot ||x|| \leq ||T|| \cdot ||x||$.

$S_X \subseteq B_X$, tedy $||T|| \geq \sup_{x \in S_X} ||T(x)||$. $\forall x \in X \setminus \{\mathbf{o}\}$:

$$\frac{||T(x)||}{||x||} = ||T(\frac{x}{||x||})|| \leq \sup_{y \in S_X} ||T(y)||,$$

tedy $\sup_{x \in S_X} ||T(x)|| \geq \sup_{x \in X \setminus \{\mathbf{o}\}} \frac{||T(x)||}{||x||} =: S_3$. Pro $x \in U_X \setminus \{\mathbf{o}\}$ platí $||T(x)|| \leq \frac{||T(x)||}{||x||} \leq S_3$, tedy $\sup_{x \in U_x} ||T(x)|| \leq S_3$. Konečně, pro $x \in B_x$: $||T(x)|| \leftarrow ||T\left(\left(1 - \frac{1}{n}\right) x\right)|| \leq \sup_{x \in U_X} =: S_4$, tedy $||T_x|| = \lim_{n \to \infty} ||T\left(1 - \frac{1}{n}\right) x|| \leq S_4 \implies \sup_{x \in B(x)} ||T(x)|| \leq S_4$.

Dle prvního bodu máme nerovnost „$\geq$“. Pro „$\leq$“ zvolme $\varepsilon > 0$ … ať $\tilde{c} > 0$ je takové, že $\tilde{c} < \inf\{\ldots\} + \varepsilon$. Pak $||T|| = \sup_{x \in B_x} \frac{||T_x||}{||x||} \leq \inf\{\ldots\}$. □

Definice 2.1

Nechť X je normovaný lineární prostor nad $\mathbb{K}$. Prostor $\mathcal{L}(X, \mathbb{K})$ značíme X^* a nazýváme jej duálním prostorem k prostoru X.

TODO!!!

TODO!!!

TODO!!!

Poznámka (Kvocient)
Nechť X je vektorový prostor nad $\mathbb{K}$ a Y jeho podprostor. Definujeme relaci ekvivalence $\sim$ na X jako $x \sim y \Leftrightarrow x - y \in Y$.

Pro $x \in X$ pak definujeme $[x]$ jako třídu ekvivalence obsahující x.

Na množině $X/Y = \{[x] | x \in X\}$ definujeme operace $[x] + [y] = [x + y]$ a $\alpha[x] = [\alpha x]$.

Definice 2.2 (Kvocient)

Nechť X je vektorový prostor a Y jeho podprostor. Pak vektorový prostor X/Y nazýváme faktoprostorem prostoru X podle Y nebo též kvocientem X podle Y. Dále definujeme tzv. kanonecké kvocientové zobrazení $q : X \to X/Y$ předpisem $q(x) = [x]$.

Definice 2.3 (Norma na kvocientu)

Buď X normovaný lineární prostor a Y jeho uzavřený podprostor. Pak $(X/Y, ||\cdot||_{X/Y})$ je normovaný lineární prostor s normou

$$||[x]||_{X/Y} = \inf_{y\in[x]} ||y|| = \inf_{y\in Y} ||x+y|| = \inf_{y\in Y} ||x-y|| = \operatorname{dist}(x+Y, 0) = \operatorname{dist}(x, Y).$$

Tato norma se nazývá kanonická kvocientová norma.

Důkaz (Je to norma)
Triviální. □

Tvrzení 2.3

Nechť X je normovaný lineární prostor a Y jeho uzavřený podprostor. Pak kanonické kvocientové zobrazení $q : X \to X/Y$ je spojitý lineární operátor, který je na a splňuje $q(U_x) = U_{X/Y}$. Je-li Y vlastní, pak $||q|| = 1$.

Důkaz
Zřejmý. □

Věta 2.4

Nechť X je Banachův prostor. Potom TODO!

Důkaz
Přes test úplnosti (X je Banachův, právě když každá abs. konvergentní řada je konvergentní). Ať $\{[x]_n | n \in \mathbb{N}\}$ splňuje $\sum_{n=1}^{\infty} < \infty$. Chceme $\sum_{[x]_n}$. Ať $\{y_n| \ n \in \mathbb{N}\} \subseteq Y$ jsou takové, že $\sum_{n=1}^{\infty} ||x_n + y_n|| < \infty$. Pak $\sum(x_n + y_n)$ je konvergentní (podle testu úplnosti) a je prvkem X, tedy $q\left(\sum_{n=1}^{\infty}(x_n + y_n)\right) = \sum_{n=1}^{\infty} q(x_n + y_n) = \sum_{n=1}^{\infty}[x_n]$. Tudíž $\sum_{n=1}^{\infty}[x_n]$ je v prostoru $q(X) = X/Y$. □

Poznámka (Zajímavosti)
l_∞/c_0 je docela zajímavý prostor (Rosemider? + Brech? 2012: Je nerozhodnutelné, zda l_∞/c_0 je izometricky univerzální Banachův prostor hustoty $|\mathbb{R}|$. Dokonce je nerozhodnutelné, zda takový prostor existuje.) ($l_\infty/c_0 \equiv \mathcal{C}(\beta\mathbb{N} \setminus \mathbb{N})$)

Definice 2.4 (Direktní součet)

Nechť X je vektorový prostor a A, B jsou jeho podprostory. Říkáme, že X je direktním (též algebraickým) součtem A a B (značíme $X = A \oplus B$) pokud $A \cap B = \{\mathbf{o}\}$ a $X = A + B = \operatorname{span}\{A \cup B\}$.

Definice 2.5 (Projekce)

Nechť X je vektorový prostor. Lineární zobrazení $P : X \to X$ se nazývá (lineární) projekce, pokud $P^2 = P \circ P = P$.

Tvrzení 2.5 (Fakt)

Nechť X je vektorový prostor.

- *Je-li $P : X \to X$ lineární projekce, pak $P \upharpoonright \operatorname{Rang} P = \mathrm{id}_{\operatorname{Rang} P}$.*
- *Je-li Y podprostor X a $P : X \to Y$ lineární zobrazení splňující $P \upharpoonright_Y = \mathrm{id}_Y$, pak P je projekce X na Y.*

Důkaz

Triviální. □

Tvrzení 2.6

Nechť X je vektorový prostor. Jsou-li P_A a P_B projekce příslušné rozkladu $X = A \oplus B$, pak $P_A + P_B = \mathrm{id}_X$, $\operatorname{Rang} P_A = A$, $\ker P_A = B$, $\operatorname{Rang} P_B = B$ a $\operatorname{Ker} P_B = A$.

Důkaz

Jednoduchý. □

Na druhou stranu, je-li P lineární projekce v X, pak $X = A \oplus B$, kde $A = \operatorname{Rang} P$, $B = \operatorname{Ker} P$ a $P = P_A$.

Důkaz

Jednoduchý. □

Věta 2.7

Nechť X je vektorový prostor a Y jeho podprostor.

- *Prostor Y má algebraický doplněk v X.*
- *Je-li A algebraický doplněk Y v X, je A algebraicky izomorfní s X/Y, speciálně $\dim(A) = \dim(X/Y)$.*

Důkaz
Díky Zornovu lemmatu existuje algebraická báze $B \subset Y$ prostoru Y. Stejně tak existuje $B' \supset B$ báze X. Potom $Z = \operatorname{span}(B' \setminus B)$ je algebraický doplněk Y v X, neboli $X = Y \oplus X$.

Ať $X = Y \oplus A$. Pak chceme $q \restriction_A \colon A \to X/Y$ je lineární izomorfismus: Víme q je lineární, q je prosté (ať $x \in A, q(x) = 0$, pak $x \in Y$, tedy $x \in A \cap Y = \{\mathbf{o}\}$, takže $x = \mathbf{o}$) a q je na (Ať $x = y + a \in X$, pak $q(x) = q(a)$, tedy $q(x) \in q|_A(A)$). □

Definice 2.6 (Kodimenze)

Je-li X vektorový prostor a Y jeho podprostor, pak kodimenzí (značíme $\operatorname{codim} Y$?) Y rozumíme dimenzi libovolného algebraického doplňku Y (což je rovno dimenzi X/Y).

Definice 2.7

Je-li X normovaný lineární prostor a $X = A \oplus B$, pak říkáme, že X je topologickým součtem A a B, pokud jsou příslušné projekce P_A a P_B spojité. Tento fakt značíme $X = A \oplus_t B$. Je-li A podprostor X, pak každý podprostor $B \subset X$ splňující $A \oplus_t B = X$ se nazývá topologický doplněk A v X. Má-li A topologický doplněk, pak říkáme, že je komplementovaný (v X).

Věta 2.8

Nechť X je normovaný lineární prostor a Y, Z jsou jeho podprostory splňující $X = Y \oplus Z$. Pak $X = Y \oplus_t Z$, právě když zobrazení $T : X \to Y \oplus_1 Z$, $T(x) = (P_Y(x), P_Z(x))$ je izomorfismus.

Důkaz
$\Longrightarrow$: $\forall x \in X$: $||T(x)|| = ||P_Y x|| + ||P_Z x|| \leq 2 \max(||P_Y||, ||P_Z||)||x|| \leq ||(P_Y + P_Z)x|| = ||x||$. Tedy T je izomorfismus.

$\Leftarrow$: $\forall x \in X$: $||P_y x|| \leq ||P_y x|| + ||P_z x|| = ||Tx|| \leq ||T|| ||x||$, tedy $||P_y|| \leq ||T||$. □

Věta 2.9

Nechť X je Banachův prostor a $Y, Z \subset X$ jeho podprostory splňující $X = Y \oplus Z$. Pak $X = Y \oplus_t Z$, právě když Y a Z jsou uzavřené.

Důkaz
Zatím bez důkazu. □

Věta 2.10

Nechť X, Y jsou normované lineární prostory. Pak

- *Y je isomorfní komplementovanému podprostoru X, právě když existují lineární operátory $S : X \to Y$ a $T : Y \to X$ splňující $S \circ T = \mathrm{id}_Y$.*

- *Y je isometrické 1-komplementovanému podprostoru X, právě když existují lineární operátory $S : X \to Y$ a $T : Y \to X$ splňující $S \circ T = \mathrm{id}_y$ a $\max\{||S||, ||T||\} \leq 1$.*

Důkaz
$\Leftarrow$: Polož $p := T \circ S : X \to X$. Pak p je zřejmě lineární a $||p|| \leq ||T|| \cdot ||S||$, navíc $p^2 = (T \circ S) \circ (T \circ S) = p$, tedy p je projekce. Zároveň $p(X) = T(S(X))$, jelikož $S \circ T$ je identita, tak S je na a $p(X) = T(Y) = \mathrm{Rang}\, T$. Zbývá si uvědomit, že T je izomorfismus (izometrie, pokud $||S||, ||T|| \leq 1$): Máme

$$\forall x \in X : ||Sx|| = ||STSx|| \leq ||S|| \cdot ||TSx||,$$

tedy (protože S je na):

$$\forall y \in Y : ||y|| \frac{1}{||S||} \leq ||Ty||,$$

tudíž T je izomorfismus.

$\implies$: Ať $P : X \to X$ je projekce, $L : P(X) \to Y$ izomorfismus na. Položíme $S := L \circ P$, $T := L^{-1}$, pak $S \circ T = L \circ P \circ L^{-1} = L \circ L^{-1} = \mathrm{id}$. $\square$

Poznámka (Zajímavosti pro všechny (nezkouší se))
Ví se ($\dim X = +\infty$, X Banach)

- X lze komplementovaně vnořit do $l_p \implies X \cong l_p$, $p \in [1, \infty]$.
- X lze komplementovaně vnořit do $c_0 \implies X \cong l_0$.
- Existuje nespočetně neizomorfních podprostorů L_p, $p \in (1, \infty)$.

Neví se:

- X lze komplementovaně vnořit do $L_1 \implies X \in \{l_1, L_1\}$.
- X lze komplementovaně vnořit do $\mathcal{C}([0, 1]) \implies X \cong \mathcal{C}(k?)$.

Ví se:

- $X \cong l_2 \Leftrightarrow (\forall Z, \dim Z = +\infty, Z Banach, Z \hookrightarrow l_2 \implies Z \cong l_2)$.

Neví se, zda platí izometrická varianta předchozího.

3 Hilbertovy prostory

Lemma 3.1

$A^\perp$ je uzavřený podprostor.

Důkaz
Pro $y \in X$ ať $f_y(x) =< x, y >$. Pak f_y je lineární a spojité (z Cauchy-Swartze). $A^\perp = \bigcap_{y\in A} f_y^{-1}(0)$. □

Definice 3.1

Prostor se skalárním součinem $(X, < \cdot, \cdot >)$ se nazývá Hilbertův prostor, pokud je úplný v metrice indukované skalárním součinem, tj. pokud $(X, || \cdot ||)$ je Banachův prostor, kde $||x|| = \sqrt{< x, x >}$.

Například
- l_2 ... $< x, y >:= \sum_{n=1}^{\infty} x_n \overline{y_n}$.
- $L_2([0, 1])$ ... $< f, g >:= \int_0^1 f(x)\overline{g(x)}dx$.

Tvrzení 3.2

Nechť $(X, < \cdot, \cdot >)$ je prostor se skalárním součinem nad $\mathbb{K}$. Pak funkce $< \cdot, \cdot >: X \times X \to \mathbb{K}$ je lipschitzovská na omezených množinách (a tedy spojitá).

Důkaz
Přímočarý s použitím Cauchy-Swartze. □

Tvrzení 3.3 (Polarizační vzorec)

Nechť X je prostor se skalárním součinem. Pak pro všechna $x, y \in X$ platí

$$< x, y >= \frac{1}{4}(||x + y||^2 - ||x - y||^2)$$

v reálném případě, resp.

$$< x, y >= \frac{1}{4}(||x + \ y||^2 - ||x - y||^2 + i||x + iy||^2 - i||x - iy||^2)$$

v komplexním.

Důkaz (Reálný případ, v $\mathbb{C}$ analogicky)

$$4 < x, y >= 2 < x, y > -2 < x, -y >= ||x+y||^2-||x||^2-||y||^2-||x-y||^2+||x||^2+||-y||^2 = ||x+y||^2-||x-$$

□

Důsledek
Nechť X, Y jsou prostory se skalárním součinem a $T : X \to Y$ je lineární izometrie do. Pak T zachovává skalární součin, tj. $< T(x), T(y) >=< x, y >$ pro každé $x, y \in X$.

Důkaz
Izometrie zachovává pravé strany v polarizačním vzorci. □

TODO!

Věta 3.4

$(X, ||\cdot||)$ je NLP. Pak $||x|| = \sqrt{\langle x, x\rangle}$ pro skalární součin $\langle\cdot,\cdot\rangle$ $\Leftrightarrow$ platí:

$$\forall x, y \in X : ||x+y||^2 + ||x-y||^2 = 2\left(||x||^2 + ||y||^2\right).$$

Důkaz (Reálný případ, komplexní analogicky)
$\implies$ z Polarizačního vzorce. Pro $\Leftarrow$ položme $\langle x, y\rangle := \frac{1}{4}\left(||x+\ y||^2 - ||x-y||^2\right)$, $x, y \in X$. Následně ověříme podmínky (kromě linearity (speciálně aditivity) je ověření triviální). Aditivita: Chceme

$$LS = \forall x, y, z \in X : \langle x+y, z\rangle + \langle x-y, z\rangle = 2\langle x, z\rangle = PS.$$

$$LS = \frac{1}{4}\left(\underline{||x+y+z||^2} - ||x+y-z||^2 + \underline{||x-y+z||^2} - ||x-y-z||^2\right) =$$

$$\overset{\text{z předpokladu}}{=} \frac{1}{4}\left(\underline{2\left(||x+z||^2 + ||y||^2\right)} - 2\left(||x-y||^2 +\ ||y||^2\right)\right) = \frac{1}{2}\left(||x+\ z||^2 - ||x-z||^2\right) = PS.$$

Tuto rovnost aplikujeme na $x = y$: $\langle 2x, z\rangle = 2\langle x, z\rangle$, a na $\tilde{x} = \frac{1}{2}(x+y)$, $\tilde{y} = \frac{1}{2}(x-y)$:

$$\langle x, z\rangle + \langle y, z\rangle = 2\left\langle \frac{1}{2}(x+y), z\right\rangle = \langle x+y, z\rangle.$$

□

Věta 3.5 (Frigyes Riesz, 1934)

Nechť C je uzavřená neprázdná konvexní množina v Hilbertově prostoru H. Pak pro každé $x \in H$ existuje právě jedno $y \in C$ tak, že $||x-y|| = \operatorname{dist}(x, C)$.

Důkaz
Zvolme $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ posloupnost v C, že $\lim_{n\to\infty} ||y_n - x|| = d(x, C)$. Chceme, že $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ je cauchyovská. Tedy, protože C je uzavřená, existuje $y \in C : y_n \to y$. Pak ale $d(x, c) = ||x-y||$.

Zbývá jednoznačnost: Ať $y, z \in C$ taková, že $||x-y|| = ||x-z|| = \operatorname{dist}(x, C)$. Pak $||y-z||^2 \le 0$, tedy $y = z$. □

Věta 3.6 (Frigyes Riesz, 1934)

Nechť X je prostor se skalárním součinem, Y jeho podprostor a $x \in X$. Pak $y \in Y$ splňuje $||x - y|| = \operatorname{dist}(x, Y)$ právě tehdy, když $x - y \in Y^\perp$.

Důkaz
Jednoduchý. □

Věta 3.7 (Frigyes Riesz, 1934)

Nechť Y je uzavřený podprostor Hilbertova prostoru H. Pak $H = Y \oplus_t Y^\perp$ a projekce $P_y : H \to Y$ příslušná rozkladu $H = Y \oplus Y^\perp$ má následující vlastnosti:

- $||P_Y(x) - x|| = \operatorname{dist}(x, Y) \leq ||x||$ *pro každé* $x \in H$,
- $||P_Y|| \leq 1$.

Důkaz
$Y \cap Y^\perp = \{\mathbf{o}\}$: Ať $x \in Y \cap Y^\perp$. Pak $\langle x, x \rangle = 0 \implies x = 0$.

$H = Y + Y^\perp$: Zvol $x \in H$. Dle vět výše existuje právě jedno $y \in Y : x - y \in Y^\perp$. Pak $x = y + x - y \in Y + \ Y^\perp$.

Tedy, $H = Y \oplus Y^\perp$, a zároveň z důkazu víme, že

$$P_Y(x) = \text{„jediný prvek } y \in Y, \text{ že } x - y \in Y^\perp\text{“} = \text{„j. p. } y \in Y, \text{ že } ||x - y|| = d(x, Y)\text{“}.$$

Tedy $||P_Y(x) - x|| = d(x, y) \leq ||x||$. Zbývá $||P_y|| \leq 1$: $||P_y x||^2 =$ □

Věta 3.8

Nechť H je Hilbertův prostor a $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset H$ je podposloupnost navzájem ortogonálních prvků. Pak řada $\sum_{n=1}^\infty x_n$ konverguje bezpodmínečně, právě když konverguje.

Důkaz

$\implies$ už víme. $\Leftrightarrow$: Víme $\sum_{n=1}^{\infty} x_n$ splňuje B-C podmínku. Tedy pro $\varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N}$:

$$\forall m > n \geq n_0 : \ ||\sum_{k=n+1}^{m} x_k|| < \varepsilon.$$

Polož $F = \{1, \dots, n_0\}$. Zvol $F' \in \mathcal{F}(\mathbb{N}) : F' \cap F = \emptyset$. Pak

$$||\sum_{k\in F'} x_k||^2 \overset{\text{Pyt. věta}}{=} \sum_{k\in F'} ||x_k||^2 \leq \sum_{k\in \min F'}^{\max F'} ||x_k||^2 = ||\sum_{\dots}^{\dots} x_k||^2 < \varepsilon.$$

□

Definice 3.2 (Ortogonální, ortonormální, maximální ortonormální, úplný ortonormální, ortonormální báze)

Je-li X prostor se skalárním součinem a $A \subset X$, řekneme, že množina A je

- ortogonální, pokud $x \perp y$ pro všechna $x, y \in A$, $x \neq y$.
- ortonormální, pokud A je ortogonální a $A \subset S_X$.
- maximální ortonormální, pokud A je ortonormální a neexistuje ortonormální množina obsahující A různá od A.
- úplný ortonormální, pokud A je ortonormální a $\overline{\text{span}} A = X$.
- ortonormální báze, pokud $A = \{e_\gamma | \gamma \in \Gamma\}$ je ortonormální množina a každé $x \in X$ lze vyjádřit jako $x = \sum_{\gamma\in\Gamma} x_\gamma e_\gamma$ pro nějaké skaláry x_γ.

TODO

Tvrzení 3.9 (Fakt)

Je-li A ortonormální množina v prostoru se skalárním součinem, pak $||x - y|| = \sqrt{2}$ pro každé dva prvky $x, y \in A$, $x \neq y$.

Důkaz

$$||x - y||^2 = ||x||^2 + ||y||^2.$$

□

Poznámka

Tedy, pokud X je separabilní se skalárním součinem $\implies$ každý ON-systém je spočetný.

Věta 3.10

Každý prostor se skalárním součinem obsahuje maximální ortonormální systém.

Důkaz
$\mathcal{P} = \{A \subset X | A$ je ON-systém$\}$ s uspořádáním inkluzí. Zvol $\mathcal{O} \subset \mathcal{P}$ lineárně uspořádané, pak $\bigcup \mathcal{O} \in \mathcal{P}$ je horní závora $\mathcal{O} \implies$ (z Zornova lemmatu) $\exists A \in \mathcal{P}$ maximální. To je hledaný maximální ON-systém. $\square$

Věta 3.11 (Besselova nerovnost)

Je-li $\{e_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ *ortonormální soustava v prostoru* X *se skalárním součinem, platí* $\sum_{\gamma \in \Gamma} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2 \leq ||x||^2$ *pro každé* $x \in X$*.*

Důkaz
Ať $F \in \mathcal{F}(\Gamma)$, $x_F := \sum_{\gamma \in F} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma$. Pak $||x||^2 = ||x - x_F||^2 + ||x_F||^2$ podle Pythagorovy věty ($x - x_F \perp x_F$: $\forall i \in F : \langle x - x_F, e_i \rangle = \langle x, e_i \rangle - \langle x_F, e_i \rangle = \langle x, e_i \rangle - \langle \langle x, e_i \rangle e_i, e_i \rangle = 0$). Tj. $||x||^2 \geq ||x_F||^2 = \sum_{\gamma \in F} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2$. Tedy máme omezení pro všechny konečné součty, tudíž celý součet bude omezen stejně (celý součet je supremum z konečných podle tvrzení někde výše). $\square$

Věta 3.12

Nechť H *je Hilbertův prostor a* $\{e_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$ *je ortonormální systém v* H*. Pak následující tvrzení jsou ekvivalentní:*

1. $||x||^2 = \sum_{\gamma \in \Gamma} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2$ *pro každé* $x \in H$ *(tzv. Parsevalova rovnost).*
2. $x = \sum_{\gamma \in \Gamma} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma$ *pro každé* $x \in H$*.*
3. $\{e_\gamma\}$ *je ortonormální báze.*
4. $H = \overline{\operatorname{span}} \{e_\gamma | \gamma \in \Gamma\}$.
5. $\{e_\gamma\}$ *je maximální ortonormální systém.*

Důkaz
1 $\implies$ 2: Nechť $\varepsilon > 0$. Zvolíme $F \in \mathcal{F}(\Gamma)$: $||x||^2 - \varepsilon < \sum_{\gamma \in F} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2$. Zvolíme $F' \supset F$, $F' \in \mathcal{F}(\Gamma)$. Pak

$$||x - \sum_{\gamma \in F'} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma||^2 \overset{\cos + \text{Pythagorova věta}}{=} ||x||^2 + \sum_{\gamma \in F'} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2 - 2\Re \left\langle x, \sum_{\gamma \in F' \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma} \right\rangle =$$

$$= \ldots + \ldots - 2\Re \sum_{\gamma \in F'} \overline{\langle x, e_\gamma \rangle} \langle x, e_\gamma \rangle = ||x||^2 - \sum_{\gamma \in F'} | \langle x, e_\gamma \rangle | < \varepsilon.$$

2 $\implies$ 3: Triviální. 3 $\implies$ 4: Triviální. 4 $\implies$ 1: Nechť $x \in H$ a $F \in \mathcal{F}(\Gamma)$, že existuje $\sum_{\gamma \in F} a_\gamma e_\gamma$ splňující $||x - \sum_{\gamma \in F} a_\gamma e_\gamma|| < \varepsilon$. Položme $y := \operatorname{span}(e_\gamma, \gamma \in F)$, pak $d(x, y) \leq ||x - \sum_{\gamma \in F} a_\gamma e_\gamma|| < \varepsilon$. (Jelikož $d(x, y) = ||x - \sum_{\gamma \in F} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma||$, neboť z lemmatu někde výše stačí ověřit $y \perp x - \sum_{\gamma \in F} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma$, tj. stačí $\forall i \in F : \left\langle x - \sum_{\gamma \in F} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma, e_i \right\rangle = 0$, což je jednoduché.)

Tedy $||x|| \leq \varepsilon + || \sum_{\gamma \in F \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma} ||$ (z Bsselovy nerovnosti víme, že suma konverguje a navíc víme, že v 1 platí $\geq$, tj. stačí dokázat $\leq$)

$$||x||^2 \leq \left(\varepsilon + || \sum_{\gamma \in F \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma} || \right)^2 = \varepsilon^2 + 2\varepsilon ||x|| + \sum_{\gamma \in F} || \langle x, e_\gamma \rangle e\gamma || \leq \varepsilon^2 + 2\varepsilon ||x|| + \sum_{\gamma \in \Gamma} | \langle x, e_\gamma \rangle |^2.$$

2 $\implies$ 5: Ať $x \in \{e_\gamma | \gamma \in \Gamma\}^\perp$ (chceme, že $x = 0$). Z 2. víme, že $x = \sum_{\gamma \in \Gamma} \langle x, e_\gamma \rangle e_\gamma = \sum 0 = 0$.

5 $\implies$ 4: Ať $Y = \overline{\operatorname{span}}(e_\gamma, \gamma \in \Gamma)$. Pak $H = Y \oplus_t Y^\perp$ (zde se používá úplnost jako předpoklad věty, ze které toto plyne). $H = Y \oplus_t \{e_\gamma | \gamma \in \Gamma\}^\perp \overset{5}{=} Y \oplus_t \{\mathbf{o}\}$. □

Poznámka
Bez úplnosti jsou ekvivalentní 1, 2, 3 a 4 a vyplývá z nich 5.

TODO!

Věta 3.13 (Ernst Sigismund Fisher (1907), Frigyes Riesz (1907))

TODO!!!

Věta 3.14 (?)

TODO!!!

Věta 3.15 (Heinrich Löwig (1934), F. Riesz (1934))

Nechť H je Hilbertův prostor. Pro každé $y \in H$ označme $f_y \in H^*$ funkcionál definovaný jako $f_y(x) = \langle x, y \rangle$ pro $x \in H$. Pak zobrazení $l : H \to H^*$, $l(y) = f_y$ je sdruženě lineární

$(I(\alpha y) = \overline{\alpha} I(y))$ *izometrie* H *na* H^*.

Důkaz
$\forall y \in H$ máme: f_y je lineární, $\forall x \in H$: $f_y(x) \leq ||x|| \cdot ||y||$, tedy f_y je spojité a $||f_y|| \leq ||y||$, $f_y\left(\frac{y}{||y||}\right) = \left\langle \frac{y}{||y||}, y \right\rangle = ||y|| \implies ||f_y|| = ||y||, y \in H. \implies I$ je izometrie, sdruženě lineární. Zbývá „na“. To se dokáže z následujícího lemmatu:

Zvol $f \in H^*$, pak $H = \operatorname{Ker} f \oplus (\operatorname{Ker} f)^\perp$. Tedy existuje $z \in (\operatorname{Ker} f)^\perp$ splňující $H = \operatorname{Ker} f \oplus_t \operatorname{span}\{z\}$. Položme $y := f(z)z$. Pak $I(y) = f$, jelikož:

$$\forall x \in H : I(y)(x) = \langle x, y \rangle = \langle x_{\operatorname{Ker} f} + \alpha_x z, y \rangle = \langle \alpha_x z, y \rangle = \alpha_x \left\langle z, \overline{f(z)} z \right\rangle = f(\alpha_x z) = f(x).$$

□

Lemma 3.16

Nechť X *je vektorový prostor,* f *je lineární forma na* X *a* $x \in X \setminus \operatorname{Ker} f$. *Pak* $X = \operatorname{Ker} f \oplus \operatorname{span}\{x\}$. *Tedy* $\operatorname{codim} \operatorname{Ker} f = 1$.

Důkaz
$\operatorname{Ker} f \cap \operatorname{span}\{x\} = \{\mathbf{o}\}$: Ať $\alpha \in \mathbb{K}$, pak pokud $\alpha x \in \operatorname{Ker} f$, pak $\alpha f(x) = f(\alpha x) = 0$, tedy $\alpha = \mathbf{o}$.

Ať $y \in X$. Pak $y = \left(y - \frac{f(y)}{f(x)} x\right) + \frac{f(y)}{f(x)} x$. □

Definice 3.3

Nechť X je komplexní normovaný lineární prostor. Symbolem X_R označme prostor X uvažovaný jako reálný. Tj. X_R je tatáž množina jako X uvažovaná s operací sčítání jako v X, s násobením reálným číslem jako v X a stejně definovanou normou.

Věta 3.17 (Reálná verze komplexního normovaného lineárního prostoru)

Nechť Z *je komplexní normovaný lineární prostor. Pak platí*

1. X_R *je reálný normovaný lineární prostor. (Zřejmé.)*
2. X_R *je úplný, právě když* X *je úplný. (Norma je pořád tatáž.)*
3. $\varphi : X \to \mathbb{C}$ *je lineární, právě když* $\Re\varphi : X_R \to \mathbb{R}$ *je lineární a* $\Im\varphi(x) = -\Re\varphi(ix)$ *pro každé* $x \in X$.
4. *Je-li* $\varphi \in X^*$, *pak funkcionál* $\psi(x) = \Re\varphi(x)$, $x \in X_R$, *patří do* $(X_R)^*$ *a platí* $||\psi|| = ||\varphi||$.
5. *Je-li* $\psi \in (X_R)^*$, *pak existuje právě jeden funkcionál* $\varphi \in X^*$ *takový, že* $\psi(x) = \Re\varphi(x)$ *pro* $x \in X_R$. *Je dán vzorcem* $\varphi(x) = \psi(x) - i\psi(ix)$ *a splňuje* $||\psi|| = ||\varphi||$.

6. *Prostory* $(X_R)^*$ *a* $(X^*)_R$ *jsou izometrické.*

Důkaz
TODO. □

Definice 3.4

Nechť X je reálný normovaný lineární prostor. Na $X \times X$ definujeme:

$$(x_1, x_2) + (y_1, y_2) = (x_1 + y_1, x_2 + y_2), \qquad x_1, x_2, y_1, y_2 \in X,$$

$$(\alpha_1 + i\alpha_2) \cdot (x_1, x_2) = (\alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_2, \alpha_1 x_2 + \alpha_2 x_1), \qquad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}, x_1, x_2 \in X,$$

$$||(x_1, x_2)||_{X_C} = \sup\left\{||(\cos\alpha)x_1 + (\sin\alpha)x_2||_X | \alpha \in [0, 2\pi)\right\}, \qquad x_1, x_2 \in X.$$

Symbolem $(X_C, ||\cdot||)$ značíme komplexní normovaný lineární prostor $(X \times X, +, \cdot, ||\cdot||_{X_C})$.

Věta 3.18 (Komplexifikace)

Je-li X *reálný normovaný lineární prostor, pak je* $(X_C, ||\cdot||)$ *komplexní normovaný lineární prostor. Je-li navíc* X *Banachův, pak je* X_C *Banachův.*

Důkaz
Linearitu nebudeme dokazovat (definice je zvolena tak, aby to vycházelo, lehké cvičení). Norma je taktéž jednoduchá, nejtěžší je dokázat, že lze vytýkat konstanty.

X_C je Banachův plyne z toho, že $X \oplus_\infty X$ je Banach a norma $||\cdot||_{X_C}$ je ekvivalentní (konstanty 1 a 2) maximové normě, která je v definici součinu metrických prostorů a součin úplných metrických prostorů je úplný. □

Definice 3.5 (Sublineární funkcionál, pseudonorma)

TODO!

Věta 3.19 (Hans Hanh (1927), Stefan Banach (1929))

Nechť X *je vektorový prostor a* Y *je podprostor.*

- *Je-li* X *reálný,* p *je sublineární funkcionál na* X *a* f *je lineární forma na* Y *splňující* $f(x) \leq p(x)$ *pro každé* $x \in Y$*, pak existuje lineární forma* F *na* X *taková, že* $F|_Y = f$ *a* $F(x) \leq p(x)$ *pro každé* $x \in X$.
- *Je-li* p *pseudonorma na* X *a* t *je linearní forma na* Y *splňující* $|f(x)| \leq p(x)$ *pro každé* $x \in Y$*, pak existuje lineární forma* F *na* X *taková, že* $F|_Y = f$ *a* $|F(x)| \leq p(x)$*,* $x \in X$.

Důkaz (1. bod)
1. krok: rozšíříme f o jednu dimenzi, tj. na $Z = Y \oplus \operatorname{span}(x)$, kde $x \notin Y$. Položme $F(y+tx) := f(y) + t\alpha$, $y \in Y$, $t \in \mathbb{R}$, kde $\alpha \in \mathbb{R}$ je vhodně zvolená: Linearita f vyplývá z definice, tedy stačí $f(y) + t\alpha \leq p(y + t\alpha)$, $y \in Y$, $t \in R \Leftrightarrow$

$$\Leftrightarrow \forall t > 0 : \alpha \leq \frac{1}{t}(p(y+tx) - f(y)) \wedge \forall t < 0 : \alpha \geq \frac{1}{2}(p(y+tx) - f(y)), y \in Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \forall t > 0 : \alpha \leq p(\frac{y}{t} + x) - f(\frac{y}{t}) \wedge \forall t < 0 : \alpha \geq f(\frac{-y}{t}) - p(\frac{-y}{t} - x), y \in Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \forall y \in Y : \alpha \in [f(y) - p(y-x), p(y+x) - f(y)] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \forall y, z \in Y : f(y) - p(y-x) \leq p(z+x) - f(z),$$

tedy máme $f(y)+f(z) = f(y+z) \leq p(y+z) \leq p(y-x)+p(z+x)$. Tedy α můžeme volit libovolně z intervalu $[\sup_y f(y) - p(y-x), \inf_y p(y\ +x) - f(y)]$.

2. krok: přidáme všechny dimenze (transfinitní) indukcí. (Hanh-Banachova věta je ekvivalentní axiomu výběru.) □

Důkaz (2. bod)
1. krok: Pro $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ aplikujeme první bod: VIme, že existuje $F : X \to \mathbb{R}$ lineární, že $F|_Y = f$. Pak ale $F(x) \leq p(x)$, $x \in X \wedge -F(x) = F(-x) \leq p(-x) = p(x), x \in X \implies |F(x) \leq p(x), x \in X|$.

2. krok: Pro $\mathbb{K} = \mathbb{C}$: Polož $g = \Re f$. Pak podle 1. části $\exists G : X_R \to \mathbb{R}$ lineární, že $G|_Y = g \wedge |G(x)| \leq p(x), x \in X$. Pak máme $f(x) = g(x) - ig(ix)$, $x \in X$ a položíme $F(x) := G(x) - iG(ix)$, $x \in X$. Pak $f|_Y = f$, F je lineární a pro $x \in X$ máme:

Zvolme $|\lambda| = 1$, $\lambda \in \mathbb{C} : |F(x)| = \lambda F(x)$, pak $|F(x)| = F(\lambda x) = G(\lambda x) - iG(i\lambda x) = G(\lambda x) \leq P(\lambda x) \leq p(x)$. □

Věta 3.20 (Hahnova-Banachova)

Nechť X je normovaný lineární prostor, Y je podprostor X a $f \in Y^*$. Pak existuje $F \in X^*$ takové, že $F|_Y = f$ a $||F|| = ||f||$.

Důkaz
Aplikujeme předchozí větu na $p(x) := ||f|| \cdot ||x||, x \in X$. Pak $|f(x)| \leq ||f|| \cdot ||x|| = p(x)$, $x \in Y \implies \exists F : X \to \mathbb{K}$ lineární, $F|_y = f$, $|F| \leq p$. Pak $|F(x)| \leq p(x) = ||f|| \cdot ||x||$, $x \in X$, tedy $||F|| \leq ||f||$ (opačná nerovnost triviální). □

Důsledek
Nechť X je netriviální normovaný lineární prostor. Pro každé $x \in X$ existuje $f \in S_{X^*}$ takové, že $f(x) = ||x||$. Odtud plyne, že jsou-li $x, y \in X$ různé body, pak existuje $f \in X^*$ takový, že $f(x) \neq f(y)$ (říkáme, že X^* odděluje body X).

Důkaz
Zvol $x \in X$. BÚNO $x \neq \mathbf{o}$. Polož $Y = \operatorname{span}(x)$, $g : Y \to \mathbb{K}$ definujeme předpisem $g(tx) := t||x||$, $\forall t \in \mathbb{K}$. Pak g je zřejmě lineární a $||g|| = 1$, protože

$$|g(tx)| = |t| \cdot ||x|| = ||tx||, \forall t \in \mathbb{K}.$$

Podle H-B $\exists f \in X^* : f|_Y = g$, $||f|| = ||y|| = 1$. Pak $f(x) = ||x||$.

Ad „speciálně“: Zvol $x + y$. Najdi $f \in S_{X^*} : f(x - y) = ||x - y||$, pak $f(x) \neq f(t)$, protože $||x - y|| \neq 0$. □

Důsledek
Je-li X normovaný lineární prostor a $x \in X$, pak $||x|| = \max_{t \in B_{X^*}} |f(x)|$.

Důkaz
Triviální. □

Důsledek (Oddělování bodu a podprosotru)
Nechť X je normovnaný lineární prostor, Y je uzavřený podprostor X a $x \notin Y$. Pak existuje $f \in S_{X^*}$ tak, že $f|_Y = 0$ a $f(x) = \operatorname{dist}(x, Y) > 0$.

Důkaz
Zvolme $Z := Y \oplus \operatorname{span}(x) \subset X$. $f(y + \alpha x) := \alpha \operatorname{dist}(x, Y)$, $y \in Y$, $\alpha \in \mathbb{K}$. Pak $f : Z \to \mathbb{K}$ je lineární. $||f|| = 1$: $|f(y + \alpha x)| = |\alpha| \operatorname{dist}(x, Y) \leq |\alpha| \cdot ||x + \frac{y}{\alpha}|| = ||\alpha x + y||$, $y \in Y$, $\alpha \in \mathbb{K}$. Zvolme $(y_n)_{n=1}^{\infty}$ v Y, že $d(x, Y) = \lim_{n\to\infty} ||x - y_n||$. Pak $\frac{|f(y_n+x)}{||y_n+x||} = \frac{d(x,Y)}{||y_n+x||} \to 1$.

Nyní z H-B věty rozšíříme na celé Y: $\exists F \in X^X : F|_z = f \wedge ||F|| = 1$. □

Věta 3.21 (Oddělování konvexních množín)

Nechť X je normovaný lineární prostor a $A, B \subset X$ jsou disjuktní konvexní množiny. Pak platí následující tvrzení

- *Je-li A otevřená, pak existuje $f \in X^*$ takový, že $\Re f(x) < \inf_B \Re f$ pro každé $x \in A$.*
- *Je-li A uzavřená a B kompaktní, pak existuje $f \in X^*$ takový, že $\sup_A \Re f < \inf_B \Re f$.*

Poznámka
Ekvivalentní H-B větě.

Důkaz
BÚNO X je nad $\mathbb{R}$. BÚNO $A \neq \emptyset \neq B$. První bod: Zvolíme $a \in A$, $b \in B$. Polož $w = b - a$ a $C = w + A - B$. Pak $w \notin C$, $\mathbf{o} \in C$, C je konvexní (A i B jsou konvexní, takže i jejich posunutý rozdíl je konvexní) a otevřená (A je otevřená, posunutý rozdíl otevřené a libovolné je otevřená). Položme $p_c(x) := \inf\{t > 0 | x \in tC\}$ (lehce se ověří, že p_c, tzv. Minkowského funkcionál, je sublineární). $p_c(x) < +\infty$ (protože C obsahuje nulu a z otevřenosti i kouli kolem ní a každé x se vejde do dostatečně nafouklé koule). $p_c \leq 1$ na C a $p_c(w) \geq 1$.

Položme $Y := \operatorname{span}(w)$, $g(\alpha w) := \alpha$, $\alpha \in \mathbb{R}$, $g : Y \to \mathbb{R}$ (pak $g \leq p_c$). Z H-B tedy plyne:

$$\exists G : X \to \mathbb{R} \text{ lineární }, G|_Y = g, G \leq p_c.$$

Pak $G \in X^*$ protože $G \leq p_c \leq 1$ na C, ale to obsahuje kouli, takže je G omezené na nějaké kouli $\implies$ je spojité.

Konečně $\forall x \in A\ \forall y \in B : G(x) = G(y) + G(x - y + w) - G(w) \leq G(y) + 1 - 1 = G(y)$. Rovnost nemůže nastat, protože A je otevřené. □

TODO

Poznámka (Nevím, kam patří)
Nějaký důsledek H-B, viz foto.

Důkaz
Z kompaktnosti máme $\max_B g < \inf_A f$. Zvol $f = -g$ a to je ta hledaná funkce. □

Důsledek (H-B věty)
X je NLP, $Y \subset X$ podprostor. Buď $\dim Y < \infty$ nebo $\operatorname{codim} Y < \infty$. Pak $Y \overset{C}{\hookrightarrow} X$. (Tj. $\exists P : X \to Y$ spojitý, že $P|_Y = \operatorname{id}_Y$.)

Důkaz

$\dim Y < \infty$: Ať $\{e_1, \dots, e_n\}$ je báze Y, $\{f_1, \dots, f_n\}$ je duální báze Y. Pak $f_1, \dots, f_n : Y \to \mathbb{K}$ jsou spojité (Y má konečnou dimenzi). Z H-B $\exists F_1, \dots, F_n : X \to \mathbb{K}$ spojité, $||F_i|| = ||f_i||$, $F_i \supset f_i$. Definujme $P : X \to Y$ předpisem $P(x) := \sum_{i=1}^n F_i(x) e_i \in Y$. P je lineární,

$$||Px|| \leq \sum_{i=1}^n ||F_i(x)|| \cdot ||e_i|| \leq \sum_{i=1}^n ||F_i|| \cdot ||x|| \cdot ||e_i|| \leq \left(n \cdot \max_{i \in [n]} ||F_i|| \cdot ||e_i|| \right) \cdot ||x||.$$

P je tedy spojité. Zbývá ověřit $P_y = \mathrm{id}_n$.

$$\forall y \in Y : P(y) = P(\sum_{i=1}^n f_i(y) e_i) = \sum_{i=1}^n f_i(Y) P(e_i) = \sum_{i=1}^n f_i(y) \sum_{j=1}^n F_j(e_i) e_j = \sum_{i=1}^n f_i(y) e_i = y.$$

$\operatorname{codim} Y < \infty$: ($\operatorname{codim} Y = \dim(X/Y)$) ať $\{q(e_1), \dots, q(e_n)\}$ je báze X/Y ($q : x \mapsto [x]$) a $\{f_1, \dots, f_n\}$ duální funkcionály. Ty jsou spojité. Polož $F_i = f_i \circ q$ ($i \in [n]$), což je složení dvou spojitých funkcionálů, tedy spojitý funkcionál. Definujeme $P : X \to \mathrm{span}(e_1, \dots, e_n)$, $P(x) := \sum_{i=1}^n F_i(x) e_i$, $x \in X$. „P je lineární“ je jasné, stejně tak spojitost P (podobně jako v první části).

$P|_{\mathrm{span}(e_1, \dots, e_n)} = \mathrm{id}$:

$$\forall i \in [n] : P(e_i) = \sum_{j=1}^n F_j(e_i) e_j = \sum_{j=1}^n f_j(q(e_j)) e_j = e_i.$$

Tedy P je spojitá lineární projekce a navíc $\operatorname{Ker} P = Y$: $Px = 0 \Leftrightarrow F_i(x) = 0 \forall in \in [n]$ $\Leftrightarrow f_i(q(x)) = 0$, $\Leftrightarrow q(x) = 0$. Máme $X = \operatorname{Rang} P \oplus_t \operatorname{Ker} P$. Položíme $Q = \mathrm{id} - P$, pak $\operatorname{Rang} Q = \operatorname{Ker} P = Y$, Q spojitá projekce. □

Definice 3.6

Nechť X, Y jsou normované lineární prostory a $T \in \mathcal{L}(x, Y)$. Operátor $T^* : Y^* \to X^*$ definovaný předpisem $T^* f(x) = f(Tx)$ pro $f \in Y^*$ a $x \in X$ se nazývá duální (nebo též adjungovaný) operátor k T.

Operátor $(T^*)^*$ značíme T^{**}.

Věta 3.22

Nechť X, Y, Z jsou normované lineární prostory.

1. *Je-li $T \in \mathcal{L}(X, Y)$, je $T * f \in X^*$ pro každé $f \in Y^*$. Dále $T^* \in \mathcal{L}(Y^*, X^*)$ a $||T^*|| = ||T||$.*
2. *Zobrazení $T \mapsto T^*$ je lineární izometrie z $\mathcal{L}(X, Y)$ do $\mathcal{L}(Y^*, X^*)$.*

3. $T \in \mathcal{L}(X,Y)$ a $S \in \mathcal{L}(Y,Z)$. Pak $(S \circ T)* = T^* \circ S^*$. Dále $\mathrm{id}_X^* = \mathrm{id}_{X^*}$.

Důkaz

1. Spojitost $T * f$ je zřejmá z definice (složení dvou lineárních funkcí), stejně tak linearita T. Dále

$$\forall y^* \in B_{Y^*} : ||T^* y^*|| = \sup_{x \in B_X} |T^* y^*(x)| = \sup_{x \in B_X} |y^*(Tx)| \leq \sup_{x \in B_X} ||Tx|| = ||T||,$$

tedy $||T^*|| \leq ||T||$ a T je spojité. Zbývá $||T|| \leq ||T^*||$. (Dokazujeme opačnou nerovnost k té výše.) Zvolme $x \in B_X$. Najdi (z jednoho z důsledků H-B) $y^* \in S_{Y^*}$. $||T_x|| = |y^*(Tx)|$. Pak

$$||Tx|| = |y^*(Tx)| = |T^* y^*(x)| \leq ||T^*|| \cdot ||y^*|| \cdot ||x|| \leq ||T^*||.$$

Tj. $||T|| \leq ||T^*||$.

2. Linearita zobrazení plyne z předpisu a izometrie pak plyne z prvního bodu.

3. $\forall z^* \in Z^* \ \forall x \in X$:

$$\left((S \circ T)^* z^*\right)(x) = z^*(S(T(x))) = S^* z^*(Tx) = \left(T^* S^* z^*\right)(x).$$

A to platí pro všechna x a z^*, tedy funkcionály na ně aplikované musí být tytéž. Identita je triviální z definice. □

Věta 3.23

Nechť H_1, H_2 jsou Hilbertovy prostory a $T \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$. Pak existuje jednoznačně určený operátor $T^\star \in \mathcal{L}(H_2, H_1)$ takový, že pro každé $y \in H_2$ a $x \in H_1$ platí

$$\langle Tx, y \rangle_{H_2} = \left\langle x, T^\star y \right\rangle_{H_1}.$$

Dále platí, že $T^\star = I_1^{-1} \circ T^* \circ I_2$, kde $I_j : H_j \to H_j^*$, $j = 1, 2$ jsou příslušné sdružené lineární izometrie z věty výše (89 ve skriptech). ($I_i : y \mapsto \langle \cdot, y \rangle \in H_1^*$.)

Důkaz

Zvol $x \in H_1$, $y \in H_2$. Uvažuj $g \in (H_1)^*$ definované předpisem $\langle Tx, y \rangle_{H_1}$. Dle věty 89 ve skriptech, $\exists! z \in H_1 : g(x) = \langle x, z \rangle$, $x \in H_1$. Tedy rovnost z věty platí $\Leftrightarrow T^\star y = z$. Celkem $\exists! T^\star : H_2 \to H_1$, pro které platí rovnost ze znění.

Zbývá: $T^\star = I_1^{-1} \circ T^* \circ I_2$ (pak operátor $T^\star$ je lineární a spojitý). Stačí jen, že $I_1^{-1} \circ T^* \circ I_2$ splňuje rovnost ze zadání, protože existuje právě jeden takový operátor. Z definice I_i a přelévání písmenek (definice sdruženého operátoru) tedy:

$$\forall x \in H_1 \ \forall y \in H_2 : \left\langle x, \left(I_1^{-1} \circ T^* \circ I_2\right)(y) \right\rangle_{H_1} =$$

$$\left(I_1 \left(I_1^{-1} \circ T^* \circ I_2\right)\right)(x) = \left(T^* \circ I_2\right)(x) = (I_2 y)(Tx) = \langle Tx, y \rangle.$$

□

Definice 3.7 (Hilbertovsky adjungovaný operátor)

Operátor $T^\star$ z předcházející věty nazýváme hilbertovsky adjungovaným operátorem k T.

Věta 3.24

Nechť H_1, H_2, H_3 jsou Hilbertovy prostory.

1. *Je-li $T \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$, je $T^{\star\star} = (T^\star)^\star = T$.*
2. *Zobrazení $T \mapsto T^\star$ je sdruženě lineární izometrie $\mathcal{L}(H_1, H_2)$ na $\mathcal{L}(H_2, H_1)$.*
3. *Nechť $T \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$ a $S \in \mathcal{L}(H_2, H_1)$. Pak $(S \circ T)^\star = T^\star \circ S^\star$. Dále $(\mathrm{id}_{H_1})^\star = \mathrm{id}_{H_1}$.*

Důkaz

1. Máme

$$\forall x \in H_1 \ \forall y \in H_2 : \left\langle T^{\star\star}x, y\right\rangle_{H_2} = \left\langle x, T^\star y\right\rangle_{H_1} = \langle Tx, y\rangle_{H_2}.$$

Tedy pro každé x, y jsou tyto operátory stejné, tedy $T^{\star\star} = T$.

2. Sdružená linearita: Zachování „+“ plyne ze vzorce, „zachování“ „·“:

$$\forall x, y \ \forall \alpha \in \mathbb{K} : \left\langle x, T^\star \alpha y\right\rangle = \langle Tx, \alpha y\rangle = \overline{\alpha}\, \langle Tx, y\rangle = \overline{\alpha} \left\langle x, T^\star y\right\rangle$$

.

Izometrie plyne z toho, že $T^\star$ je složení izometrií. To že je na plyne z 1.

$$3. \forall x, y : \left\langle x, (S \circ T)^\star y\right\rangle = \langle S(Tx), y\rangle - \langle Tx, S^\bigstar y\rangle = \left\langle x, T^\star S^\star y\right\rangle.$$

$\square$

Definice 3.8 (Sdružený exponent)

Nechť $p \in \mathbb{R}$, $p \geq 1$, nebo $p = \infty$. Číslo $q \in \mathbb{R}$, $q \geq 1$, nebo $q = \infty$ nazýváme sdruženým exponentem k p, pokud platí $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.

Věta 3.25 (Reprezentace duálů ke klasickým prostorům)

Nechť $I \neq \emptyset$.

1. *Prostor $c_0(I)*$ je lineárně izometrický s prostorem $l_1(I)$ pomocí zobrazení $I : l_1(I) \to c_0(I)^*$, $I(y) = f_y$, kde*
$$f_y(x) = \sum_{i \in I} x_i y_i.$$
2. *Je-li $1 \leq p < \infty$ a q je sdružený exponent k p, pak prostor $l_p(I)^*$ je lineárně izometrický*

s prostorem $l_q(I)$ *pomocí zobrazení* $I : l_q(I) \to l_p(I)^*$, $I(y) = f_y$, *kde*

$$f_y(x) = \sum_{i \in I} x_i y_i.$$

3. *Je-li* (Ω, S, μ) *libovolný prostor s mírou* $1 < p < \infty$ *a* q *je sdružený exponent k* p, *pak prostor* $L_p(\mu)^*$ *je lineárně izometrický s prostorem* $L_q(\mu)$ *pomocí zobrazení* $I : L_q(\mu) \to L_p(\mu)^*$, $I(g) = \varphi_g$, *kde*

$$\varphi_g(f) = \int_\Omega f \cdot g d\mu.$$

4. *Je-li* (Ω, S, μ) *prostor se* σ*-konečnou mírou, pak prostor* $L_1(\mu)^*$ *je lineárně izometrický s prostorem* $L_\infty(\mu)$ *pomocí zobrazení* $I : L_\infty(\mu)$ *pomocí zobrazení* $I : L_\infty(\mu) \to L_1(\mu)^*$, $l(g) = \varphi_g$, *kde*

$$\varphi_g(f) = \int_\Omega f \cdot g d\mu.$$

Důkaz
1. $||I|| \leq 1$:

$$\forall y \in l_1(I)\, \forall x \in c_0(I)\, \forall F \in \mathcal{F}(I) : |\sum_{i\in F} y_i x_i| \leq \sum_{i\in F} |y_i x_i| \leq ||x||_\infty \cdot \sum_{i\in F} |y_i| \leq ||x||_\infty \cdot ||y||_1 \implies$$

$$\implies |I(y)(x)| \leq ||x||_\infty \cdot ||y||_1,$$

takže opravdu $I(y) \in c_0(I)^*$ a navíc $||I(y)|| \leq ||y||_1$, tedy I je lineární, dobře definované, $||I|| \leq 1$.

Izometrie: Zvol $y \in l_1(I)$, zvol $F \in \mathcal{F}(I)$. Polož $x_F := \sum_{i\in F, y(i)\neq 0} \frac{|y(i)|}{y(i)} e_i \in B_{c_0(I)}$. Pak

$$||I(Y)|| \geq |I(y)(x_F)| = |\sum_{i\in F, y(i)\neq 0} y(i) \cdot \frac{|y(i)|}{y(i)}| = \sum_{i\in F} |y(i)|.$$

Tedy, protože $||y||_1 = \sup_{F\in\mathcal{F}(I)} \sum_{i\in F} y(i)$, dostáváme $||I(y)|| \geq ||y||$.

Zbývá už jen „na“: Zvol $f \in c_0(I)^*$. Polož $y(i) := f(e_i)$, $i \in I$. Pak $y \in l_1(I)$: Zvol $F \in \mathcal{F}(I)$. Pak

$$\sum_{i\in F} |y(i)| = \sum_{i\in F, y(i)\neq\ 0} y(i) \cdot \frac{|y(i)|}{y(i)} = \sum_{i\in F, y(i)\neq\ 0} f(e_i) \cdot \frac{|y(i)|}{y(i)} = f\left(\sum_{i\in F, y(i)\neq\ 0} \frac{|y(i)|}{y(i)} \cdot e_i\right) \leq ||f||.$$

Tudíž $y \in l_1(I)$ (a $||y||_1 \leq ||f||$).

Chceme $I(y) = f$: Máme $\forall i \in I : I(y)(e_i) = y(i) = f(e_i)$. Tedy $I(y) = f$ na e_i, takže z linearity a spojitosti na $\overline{\text{span}}(e_i, i \in I) = c_0(I)$.

2. Případ $p = 1$: $||I|| \leq 1$ se dokáže jako v důkazu 1:

$$\forall y \in l_\infty(I)\ \forall x \in l_1(I)\ \forall F \in \mathcal{F}(I) : \sum_{i\in F} |y_i x_i| \leq ||y||_\infty \cdot ||x||_1.$$

I izometrie: Ať $y \in l_\infty(I)$, pak

$$\forall i \in I :\ ||I(y)|| \geq |I(y)(e_i)| = |y(i)| \implies ||I(y)|| \geq \sup_i |y(i)| = ||y||_\infty.$$

I je na: Ať $f \in l_1(I)^*$. Polož $y(i) := f(e_i)$, $i \in I$. Pak $y \in l_\infty(I)$:

$$\forall i \in I : |y(i)| = |f(e_i)| \leq ||f|| \implies ||y||_\infty \leq ||f||.$$

$I(y) = f$ je totožné jako v důkazu 1.

2. Případ $p > 1$: $||I|| \leq 1$ se dokáže podobně jen se použije Hölder:

$$\forall y \in l_q(I)\ \forall x \in l_p(I)\ \forall F \in \mathcal{F}(I) : \sum_{i\in F} |y_i x_i| \leq ||y||_q \cdot ||x||_p.$$

I izometrie: Ať $y \in l_q(I)$. Polož $x_F = \frac{\sum_{i\in F, y(i)\neq 0} \frac{|y(i)|}{y(i)} e_i}{||---||---||_p} \in S_{l_p(I)}$ (BÚNO $\exists i \in F : y(i) \neq 0$).