

Элементы теории линейных операторов в гильбертовых пространствах и её приложение к линейным операторным уравнениям в гильбертовом пространстве.

Пусть H — гильбертово пространство, то есть полное евклидово пространство со скалярным произведением. Скалярное произведение определим в комплексном пространстве: $(f, g) \in \mathbb{C}$. Тогда $\|f\| = \sqrt{(f, f)}$ — евклидова норма. Также в этом пространстве выполняется неравенство треугольника $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|$, которое следует из неравенства Коши-Буняковского $|(f, g)| \leq \|f\| \|g\|$.

Полнота по определению: $\forall \{f_n\} \subset H: \forall n, m \in \mathbb{N} \|f_n - f_m\| \rightarrow 0$ при $n, m \rightarrow \infty$ следует, что $\exists h \in H: \|f_n - h\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$.

$G \subset \mathbb{R}^m$ — открытое множество. $CL_2(G) = \{f : G \rightarrow \mathbb{C} | f \text{ непрерывная, } \int_G |f|^2 dx < +\infty\}$.

Введём скалярное произведение как $(f, g) = \int_G f(x) \overline{g(x)} dx$. Тогда такое множество неполное. $L_2(G)$ — пополнение $CL_2(G)$, или по-другому $f : G \rightarrow \mathbb{C}$ измерима по Лебегу и $\int_G |f|^2 dG < +\infty$.

Геометрия гильбертова пространства

1) Пусть $L \subset H: L$ — замкнутое подпространство. Следовательно $\forall f \in H \exists! g \in L: \|g - f\| = \rho(f, L)$ или по-другому $\inf \|f - h\|, h \in L$. Обозначим g_f — проекция f . Тогда отображение $P : H \rightarrow L$ такое, что $Pf = g_f$, называется ортопроектором из L на H .

Доказательство

Покажем существование. $\forall f \in H \exists \{g_n\} \subset L: \rho(f, L) \leq \|f - g_n\| \leq \rho(f, L) + \frac{1}{n}$. Тогда $\|f - g\| \rightarrow \rho(f, L)$ $n \rightarrow \infty$. Установим факт фундаментальности. Наблюдение: из равенства параллелограмма следует: $f, g \in H \|f + g\|^2 + \|f - g\|^2 = 2\|f\|^2 + 2\|g\|^2$. Тогда

$$\begin{aligned} \|g_n - g_m\|^2 &= \|(g_n - f) - (g_m - f)\|^2 = 2\|g_n - f\|^2 + 2\|g_m - f\|^2 - \|g_n + g_m - 2f\|^2 \leq \\ \|g_n + g_m - 2f\|^2 &= 4\left\| \underbrace{\frac{g_n + g_m}{2}}_{\in L} - f \right\|^2 \geq 4\rho^2(f, L) \\ \leq 2 \underbrace{\|g_n - f\|^2}_{\rho^2(f, L)} + 2 \underbrace{\|g_m - f\|^2}_{\rho^2(f, L)} - 4\rho^2(f, L) &\rightarrow 0 \text{ при } n, m \rightarrow \infty \end{aligned}$$

$\exists g \in H: g_n \rightarrow g$ по норме, а так как L — замкнутое, то $g \in L$. Получаем

$$\|f - g\| - \underbrace{\|f - g_n\|}_{\text{стремится к } \rho} \leq \|g - g_n\| \rightarrow 0 \Rightarrow \|f - g\| = \rho(f, L)$$

Отсюда следует существование.

Покажем единственность. Пусть $\|f - g_1\| = \|f - g_2\| = \rho(f, L)$, g_1 и $g_2 \in L$.

$$0 \leq \|g_1 - g_2\|^2 = \|(g_1 - f) - (g_2 - f)\|^2 = 2\|g_1 - f\|^2 + 2\|g_2 - f\|^2 - \left\| \frac{g_1 + g_2}{2} - f \right\|^2 \leq 4\rho^2 - 4\rho^2 = 0$$

Следовательно $g_1 = g_2$. Доказательство закончено

Таким образом мы доказали теорему Рисса о расстоянии. Пусть $P_L : H \rightarrow L, P_L f = g_f$. Тогда $\|P_L f - f\| = \rho(f, L)$. P_L — линейный оператор. Наблюдение: $\|g - f\| = \rho(f, L); g \in L$ равносильно тому, что

$$\begin{cases} f - g \in L^\perp \\ g \in L \end{cases}$$

Где $L^+ = \{h \in H | (h, f) = 0 \ \forall f \in L\}$ — замкнутое подпространство. Замкнутое в силу неравенства Коши-Буняковского: пусть $h_n \rightarrow h$ и $h_n \in L^+$. Тогда

$$|(h, f) - (h_n, f)| = |(h - h_n, f)| \leq \|h - h_n\| \|f\| \rightarrow 0$$

Поэтому $(h, f) = 0$, а значит $h \in L$. Докажем теперь наше наблюдение

Доказательство

В прямую сторону.

$$\begin{aligned} \|g - f\| &= \rho(f, L) \\ \|g - f\| &\leq \|\underbrace{(g + h^t) - f}_{\in L}\| \ \forall h \in L \\ \|g - f\|^2 &\leq \|(g - f) + h^t\|^2 \\ 0 &\leq 2 \operatorname{Re}(g - f, th) + |t|^2 \|h\|^2 \\ 0 &\leq 2 \operatorname{Re}(g - f, \frac{t}{|t|}h) + \underbrace{O(|t|)}_{\text{стремиться к 0}} \end{aligned}$$

Пусть $t \in \mathbb{R}$. $0 \leq 2 \operatorname{Re}(g - f, h)$, подставляя $\pm h$ имеем $\operatorname{Re}(g - f, h) = 0$. Пусть теперь $t = i\tau$, $\tau \in \mathbb{R}$. $2 \operatorname{Re}(g - f, ih) = 2 \operatorname{Im}(g - f, h) \geq 0 \ \forall h \in L$. Возьмём $\pm h$ и получаем $(g - f, h) = 0$. Таким образом для любого h мы доказали в прямую сторону.

В обратную сторону. $\forall h \in L \ \|f - (g + h)\|^2 = \|f - g\|^2 + \|h\|^2 \geq \|f - g\|^2 \Rightarrow$ при $h = 0$ $\|f - g\|^2 = 0$. Доказательство закончено.

Докажем линейность оператора P_L .

$$\begin{aligned} P_L(f_1 + f_2) &= g \\ P_L f_1 = g_1 &\Leftrightarrow (f_1 - g_1, h) = 0 \\ P_L f_2 = g_2 &\Leftrightarrow (f_2 - g_2, h) = 0 \end{aligned}$$

Сложим правые выражения и получим $(f_1 + f_2 - (g_1 + g_2), h) = 0 \Rightarrow g_1 + g_2 = P_L(f_1 + f_2)$. Аналогично доказывается однородность $P_L(\alpha f) = \alpha P_L(f)$: $P_L(f) = g \Leftrightarrow (f - g, h) = 0 \Rightarrow (\alpha f - \alpha g, h) = 0 \Rightarrow P_L(\alpha f) = \alpha g$.

Проблема выпуклости в H

Пусть $A \subset H$ — назовём выпуклым, если $\forall f, g \in A \ \forall t \in [0; 1] \ tf + (1 - t)g \in A$. Мы уже доказали, что для любого выпуклого и замкнутого $A \subset H \ \forall f \in H \ \exists! g \in A$: $\|f - g\| = \rho(f, A)$. Такое множество ещё называют чебышевским. Верно ли обратное? Пусть $A \subset H$ — чебышевское, то есть $\forall f \in H \ \exists! g \in A$: $\|f - g\| = \rho(f, A)$. Следует ли отсюда, что A — выпуклое и замкнутое? Замкнутость была доказана в 1936 году для конечномерных H . Интересные подвижки были получены на мехмате Бородиным Петром Анатольевичем. Он ввёл 2-чебышевские множества. $\forall f, h \in H$ пусть $\rho_2(f, h, A) = \inf\{\|f - g\| + \|h - g\| : g \in A\}$, $2\rho(f, A) = \rho_2(f, A)$. Из 2-чебышевости следует выпуклость и замкнутость. Но получаем вопрос: верно ли что из чебышевости следует 2-чебышевость?

2) **Теорема** (Рисса об ортогональном дополнении) $L \subset H$ — замкнутое подпространство $\Rightarrow L \oplus L^+ = H$ и $L \cap L^+ = \emptyset$. Последнее очевидно. $\forall f \in H \ \exists! g \in L$ и $h \in L^+$: $f = g + h$.

$$\begin{cases} f - g \in L^+ \\ g \in L \end{cases}$$

Это равносильно $P_L f = g$.

Доказательство

$f \in H$, смотрим на $g = P_L f \Leftrightarrow h = f - g \in L^+ \Rightarrow f = g + h$ Доказательство закончено.

Пусть $g_1, g_2 \in L$, $h_1, h_2 \in L^+$, $f = g_1 + h_1 = g_2 + h_2$. Тогда $\underbrace{g_1 - g_2}_{\in L} = h_2 - h_1 \in L^+$, но $L \cap L^+$

$\Rightarrow g_1 = g_2$ и $h_1 = h_2$.

Теорема (Рисс, Фреше)

$\Phi : H \rightarrow \mathbb{C}$ — линейный и непрерывный функционал ($f_n \rightarrow f$ в H по норме, $\Phi(f_n) \rightarrow \Phi(f)$ в \mathbb{C}). Тогда $\exists! h \in H$: $\Phi(f) = (f, h)$.

Доказательство

$L = \ker \Phi$ — замкнутое подпространство в H . Первое в связи непрерывности, второе в силу линейности. $L \oplus L^+$. Случай $\Phi = 0$ очевиден: $h = 0$. Пусть теперь $\Phi \neq 0 \Rightarrow (\ker \Phi)^+ \neq \{0\}$ Пусть $h_0 \in (\ker \Phi)^+ \setminus \{0\}$, тогда отсюда следует $f \in H$ $f = \underbrace{g}_{\in \ker \Phi} + \alpha h_0$, где $\alpha = \frac{\Phi(f)}{\Phi(h_0)}$.

Следовательно $g = f - \frac{\Phi(f)}{\Phi(h_0)} h_0 \Rightarrow (f, h_0) = \underbrace{(g, h_0)}_0 + \frac{\Phi(f)}{\Phi(h_0)} \|h_0\|^2$. Тогда $\Phi(f) = (f, \underbrace{\frac{\overline{\Phi(h_0)}}{\|h_0\|} h_0}_{\text{равно } h})$.

Пусть $\Phi(f) = (f, h_1) = (f, h_2) \forall f \in H$. $f = h_1 - h_2 \Rightarrow \|h_1 - h_2\|^2 = 0 \Rightarrow h_1 = h_2$.