

Функциональный анализ

2025–2026

Спасибо всем, чьи конспекты лежат на **диске**, а так же **неизвестному автору**.

Содержание

I Гильбертовы пространства	3
35 Теорема о разложении элемента гильбертова пространства в ряд Фурье, условие полноты ОНС	3
36 Существование ОНБ и изоморфность сепарабельных гильбертовых пространств	4
37 Классические ряды Фурье	5
II Линейные функционалы	7
38 Теорема Рисса о представлении линейного функционала для вещественного пространства.	7
39 Геометрический смысл линейного функционала. Теорема о норме линейного функционала	9
40 Формулировка теоремы Хана—Банаха о продолжении линейного функционала для вещественного пространства. Продолжение линейного функционала с подпространства на линейную оболочку подпространства и вектора	10
41 Лемма Цорна. Доказательство теоремы Хана—Банаха для вещественного пространства (без доказательства возможности продолжения линейного функционала с подпространства на линейную оболочку подпространства и вектора)	11
42 Обобщённый предел в пространстве ограниченных последовательностей	13
43 Теорема Боненблуста—Собчика о продолжении линейного функционала для комплексного пространства	14
44 Теорема Хана—Банаха для нормированного пространства. Следствия: о достаточном числе линейных функционалов, формула для нормы элемента пространства, формула для расстояния до подпространства, критерий полноты системы элементов	15
45 Сепарабельность пространства, у которого сопряжённое пространство сепарабельно	17
46 Принцип равномерной ограниченности. Сильная сходимости линейных операторов, оценка нормы сильного предела	18
47 Теоремы Банаха—Штейнгауза: критерий сходимости операторов	20
48 Обратный оператор к $I - A$, где A — сжатие. Множество обратных операторов открыто	21
49 Определение открытого отображения. Критерий открытости для линейного оператора. Условия существования непрерывного обратного оператора	23

50 Теорема Банаха об открытом отображении	24
51 Теорема Банаха об обратном операторе. Эквивалентность норм, в которых пространство банахово	25
52 Замкнутый оператор. Теорема о замкнутом графике. Пример замкнутого, но не непрерывного оператора	25
53 Сопряжённые пространства к пространствам последовательностей C_0 , l^p , пространству L^p для конечных p	27
54 Второе сопряжённое пространство. Каноническое вложение. Рефлексивность. Примеры	30
III Сопряжённые операторы	32
55 Существование и простейшие свойства сопряжённого оператора в нормированном пространстве	32
56 Теорема об интегральном операторе с ядром из L^p и сопряжённом к нему	33
57 Существование и простейшие свойства эрмитово-сопряжённого оператора в гильбертовом пространстве	34
58 Теорема об интегральном операторе с ядром из L^2 и эрмитово-сопряжённом к нему	35
59 Теорема об образе и ядре оператора и его сопряжённого. Теорема об ортогональном дополнении инвариантного подпространства. Самосопряжённый оператор, примеры	36
60 Определение спектра и резольвенты оператора. Теорема о свойствах резольвенты	37
61 Теорема о компактности и непустоте спектра. Формула для спектрального радиуса. Следствие о спектре сопряжённого оператора	39
62 Компактные операторы. Компактность оператора конечного ранга. Размерность замкнутого подпространства образа компактного оператора. Следствия	41
63 Теорема об арифметических операциях с компактными операторами. Предел компактных операторов. Компактность эрмитово-сопряжённого оператора	42
64 Конечность числа линейно-независимых собственных векторов компактного оператора, соответствующих собственным числам, модули которых равномерно отделены от нуля. Следствия	44
IV Теория Фредгольма	45
65 Условие разрешимости уравнения Фредгольма. Замкнутость образа оператора Фредгольма	45
66 Альтернатива Фредгольма: инъективность оператора Фредгольма эквивалентна его сюръективности	47
67 Теорема о числе линейно-независимых решений однородного уравнения Фредгольма. Следствие о спектре компактного оператора	48
68 Простейшие свойства самосопряжённого оператора	49
69 Существование собственного числа, модуль которого равен норме компактного самосопряжённого оператора	51
70 Теорема Гильберта—Шмидта о представлении компактного самосопряжённого оператора в виде суммы ортогональных проекторов	51

71 Теорема Гильберта—Шмидта о существовании ОНБ из собственных векторов компактного самосопряжённого оператора	52
72 Компактность интегрального оператора с ядром из L^2	53

Часть I

Гильбертовы пространства

35. Теорема о разложении элемента гильбертова пространства в ряд Фурье, условие полноты ОНС

Теорема 1. H — гильбертово, $\{e_n\}_{n=1}^\infty$ — ОНС

Следующие условия равносильны:

1. $x \in \overline{\mathcal{L}\{e_n\}_{n=1}^\infty}$;
2. $x = \sum_{n=1}^\infty (x, e_n) e_n$;
3. равенство Парсеваля: $\|x\|^2 = \sum_{n=1}^\infty |(x, e_n)|^2$.

Доказательство.

- $1 \implies 2$

Возьмём $\varepsilon > 0$.

$$\exists y \in \mathcal{L}\{e_n\} : \|x - y\| < \varepsilon$$

$$y = \sum_{j=1}^m \alpha_j e_j$$

$$L_n = \mathcal{L}\{e_j\}_{j=1}^n \implies y \in L_m$$

$$P_{L_m} x = \sum_{j=1}^m (x, e_j) e_j =: S_m$$

$$\|x - S_m\| = \min_{h \in L_m} \|x - h\| \leq \|x - y\| < \varepsilon$$

$$L_{m+1} \supset L_m \implies \rho(x, L_{m+1}) \leq \rho(x, L_m) = \|x - S_m\| < \varepsilon$$

$$\|x - S_{m+1}\| \leq \|x - S_m\| \implies \|x - S_n\| < \varepsilon \quad \forall n, m \implies \lim_{m \rightarrow \infty} S_m = x$$

- $2 \implies 1$

$$x = \lim S_m \implies x \in \overline{\mathcal{L}\{e_j\}}$$

- $2 \implies 3$

$$x = \lim S_n, \quad S_n = \sum_{j=1}^n (x, e_j) e_j$$

$$(x, x) = \lim (S_n, S_n)$$

$$\|S_n\|^2 = (S_n, S_n) = \sum_{j=1}^n |(x, e_j)|^2 =: \sigma_n$$

$$\|x\|^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n$$

• $3 \Rightarrow 2$

$$\begin{aligned} x &= S_n + (x - S_n), \quad w := x - S_n, \quad w \perp S_n \\ \Rightarrow \|x\|^2 &= \|S_n\|^2 + \|x - S_n\|^2 \\ \|S_n\|^2 &= \sigma_n, \quad \lim \|S_n\|^2 = \|x\|^2 \\ \Rightarrow \lim \|x - S_n\|^2 &= 0 \Rightarrow \lim S_n = x \end{aligned}$$

□

Следствие. H — гильбертово, $\{e_n\}_{n=1}^\infty$ — полная ОНС

$$\forall x \in H \quad x = \sum_{n=1}^\infty (x, e_n) e_n, \quad \|x\|^2 = \sum_{n=1}^\infty |(x, e_n)|^2$$

Следствие. H — гильбертово, $\{e_n\}_{n=1}^\infty$ — полная ОС.
Тогда $\{e_n\}_{n=1}^\infty$ — базис.

Доказательство. Уже доказано, что

$$x \in H, \quad x \in \overline{\mathcal{L}\{e_n\}} \Rightarrow x = \sum_{n=1}^\infty (x, e_n) e_n$$

Проверим единственность разложения

$$x = \sum_{j=1}^\infty \alpha_j e_j$$

Рассмотрим частичную сумму:

$$\sigma_n = \sum_{j=1}^n \alpha_j e_j, \quad \lim \sigma_n = x$$

$$(\sigma_n, e_k) = \alpha_k \text{ при } n \geq k \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} (\sigma_n, e_k) = \alpha_k$$

При этом,

$$\lim(\sigma_n, e_k) \stackrel{\text{непр. ск. произв.}}{=} (x, e_k) \Rightarrow \alpha_k = (x, e_k)$$

□

36. Существование ОНБ и изоморфность сепарабельных гильбертовых пространств

Теорема 2. H — сепарабельное гильбертово пространство.
Тогда в H существует ОНБ.

Доказательство. Существует всюду плотное $\{x_n\}_{n=1}^\infty$, т. е. $\overline{\{x_n\}} = H$. Значит, $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ — полная, т. е. $\overline{\mathcal{L}\{x_n\}} = H$.

Положим $x_1 = \dots = x_{n_1-1} = 0, \quad x_{n_1} \neq 0, \quad z_1 := x_{n_1}, \quad L_1 = \mathcal{L}\{z_1\}$.

$$L_1 = \mathcal{L}\{x_1, \dots, x_{n_1}\}$$

$$x_{n_1+1} \in L_1, \dots, x_{n_2-1} \in L_1, \quad x_{n_2} \notin L_1, \quad z_2 := x_{n_2}, \quad L_2 = \mathcal{L}\{z_1, z_2\}$$

И так далее по индукции.

$$z_1, z_2, \dots, z_m, \quad z_m = x_{n_m}$$

- Если $x_k \in L_m \quad \forall k > m$, то $\dim H = m$.
- Если $x_{n_m+1}, \dots, x_{n_{m+1}-1} \in L_m, \quad \exists x_{n_{m+1}} \notin L_m$, то $z_{m+1} := x_{n_{m+1}}$.

$\{z_m\}_{m=1}^{\infty}$ ЛНЗ

$$\mathcal{L}\{z_1, \dots, z_n\} = \mathcal{L}\{x_1, \dots, x_{n_m}\} \implies \mathcal{L}\{z_m\} = \mathcal{L}\{x_n\}$$

Значит, $\{z_m\}$ — полная ЛНЗ система. Применим к ней процесс ортогонализации Грама—Шмидта, получим набор $\{e_j\}$.

$$\mathcal{L}\{e_j\} = \mathcal{L}\{z_j\} \implies \{e_j\} \text{ — полная ОНС}$$

□

Теорема 3. Все бесконечномерные сепарабельные гильбертовы пространства линейно изометрически (с сохранением нормы) изоморфны друг другу.

Доказательство. H — сепарабельное гильбертово пространство. Докажем, что оно линейно изометрически изоморфно l^2 .

Известно, что в H существует ОНБ $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$.

$$x \in H \quad x = \sum_{n=1}^{\infty} (x, f_n) f_n$$

Определим оператор $T : H \rightarrow l^2$:

$$Tx = \{(x, e_n)\}_{n=1}^{\infty}$$

В l^2 мы попадаем в силу равенства Парсеваля:

$$\|x\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(x, e_n)|^2 \implies \begin{cases} Tx \in l^2, \\ T \text{ — изометрия, т. е. } \|Tx\|_2 = \|x\|_H. \end{cases}$$

Из свойств скалярного произведения очевидно, что $T \in \mathcal{L}in(H, l^2)$.

$$\|Tx\| = \|x\| \implies \|T\| = 1, \quad T \in \mathcal{B}(H, l^2)$$

Проверили, что $T(H) \subset l^2$. Докажем равенство.

Возьмём $y = \{y_n\}_{n=1}^{\infty} \in l^2$.

$$\sum_{n=1}^{\infty} |y_n|^2 = \|y\|_2^2 < +\infty$$

$$g_n := \sum_{j=1}^n y_j f_j \in H$$

Проверим, что $\{g_n\}$ фундаментальна.

Применим критерий Коши к $\sum |y_n|^2 < +\infty$:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N : \quad \forall m > n \geq N \quad \|y_{n+1}\|^2 + \dots + \|y_m\|^2 < \varepsilon$$

$$\|g_m - g_n\|^2 = \left\| \sum_{j=n+1}^m y_j f_j \right\|^2 = \sum_{j=n+1}^m |y_j|^2 < \varepsilon$$

Значит, $\{g_n\}$ фундаментальна.

$$\xrightarrow[H \text{ — гильбертово}]{} \exists g = \lim g_n \implies g = \sum_{j=1}^{\infty} y_j f_j \xrightarrow[\text{разложение единственно}]{} e_j = (g, f_j) \implies T(g) = y$$

□

37. Классические ряды Фурье

Теорема 4 (Вейерштрасс). $f \in \tilde{\mathcal{C}}[-\pi, \pi]$, т. е. $f(-\pi) = f(\pi)$, $f \in \mathcal{C}[-\pi, \pi]$.

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists T_n(x) = \alpha_0 + \sum_{k=0}^n (\alpha_k \cos(kx) + \beta_k \sin(kx)) : \quad \|f - T_n\|_\infty < \varepsilon$$

Без доказательства. □

Примеры.

1. $L^2_{\mathbb{R}}[-\pi, \pi]$, λ — мера Лебега

$$(f, g) = \int_{-\pi}^{\pi} f(x)g(x) \, dx$$

Докажем, что $\{1, \cos nx, \sin nx\}_{n=1}^{\infty}$ — полная ОС.

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \sin(mx) \, dx = 0, \quad \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \cos(mx) \, dx = \begin{cases} 0, & n \neq m, \\ \pi, & n = m. \end{cases}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} 1 \, dx = 2\pi$$

$f \in L^2[-\pi, \pi]$, $\mathcal{C}[-\pi, \pi]$ плотно в $L^2[-\pi, \pi]$

$$\exists g \in \mathcal{C}[-\pi, \pi] : \quad \|f - g\|_2 < \varepsilon$$

Утверждается, что g можно сделать 2π -периодической, не сильно испортив её норму в l^2 .

$$\exists \delta > 0 : \quad \left(\int_{\pi-\delta}^{\pi} |g(x)|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} < \varepsilon$$

$$h(x) := \begin{cases} g(x), & x \in [-\pi, \pi - \delta], \\ h(\pi) = g(-\pi), \\ \text{по непрерывности иначе} \end{cases}$$

$$\exists T_n : \quad \|h - T_n\|_\infty < \varepsilon \implies \left(\int_{-\pi}^{\pi} \underbrace{|h(x) - T_n(x)|^2}_{< \varepsilon} \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon \sqrt{2\pi}$$

$$\|f - h\|_2 \leq \|f - g\|_2 + \|g - h\|_2$$

$$\|f - T_n\|_2 \leq \underbrace{\|f - g\|_2}_{< \varepsilon} + \|g - T_n\|_2 < \varepsilon + \|g - h\|_2 + \|h - T_n\|_2 < 3\varepsilon + \varepsilon \sqrt{2\pi}$$

Базис:

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos(nx)}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin(nx)}{\sqrt{\pi}} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$$

Коэффициенты Фурье:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) \, dx, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) \, dx, \quad k \in \mathbb{N}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \, dx$$

$$S_n(x) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx))$$

Ряд Фурье сходится в функции в пространстве L^2 :

$$\forall f \in L^2[-\pi, \pi] \quad \|f - S_n\|_2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

То есть,

$$\lim \left(\int_{-\pi}^{\pi} |f(x) - S_n(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} = 0$$

2. $L^2_{\mathbb{C}}[-\pi, \pi], \quad f \in L^2_{\mathbb{C}}[-\pi, \pi]$

$$f = u + iv, \quad u, v \in L^2_{\mathbb{R}}[-\pi, \pi]$$

Аналогично, $\{1, \cos(nx), \sin(nx)\}_{n \in \mathbb{N}}$ — полная ОНС в $L^2_{\mathbb{C}}$.

3. $L^2_{\mathbb{C}}[-\pi, \pi]$

Докажем, что $\{e^{inx}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ — полная ОС в $L^2_{\mathbb{C}}$.

$$(f, g) = \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \overline{g(x)} dx, \quad \int_{-\pi}^{\pi} e^{inx} e^{-imx} dx = \begin{cases} 0, & n \neq m, \\ 2\pi, & n = m \end{cases}$$

Получаем коэффициенты:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx, \quad n \in \mathbb{Z}$$

- $c_0 = a_0$;

- $n \in \mathbb{N}$

$$c_n = \frac{1}{2}(a_n - ib_n);$$

- $n \in \mathbb{N}$

$$c_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + ib_n).$$

$$S_n := \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx} = a_0 + \sum (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx))$$

ОНБ:

$$\left\{ \frac{e^{inx}}{\sqrt{2\pi}} \right\}_{n \in \mathbb{Z}}$$

4. $L^2_{\mathbb{R}}[0, \pi]$

Докажем, что $\{1, \cos(nx)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ — ОС в L^2 .

$$f \in L^2_{\mathbb{R}}[0, \pi], \quad f(-x) := f(x) \implies f \in L^2[-\pi, \pi]$$

$$\|f - S_n\|_2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx = 0$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} |f(x) - \sum a_k \cos(kx)|^2 dx \rightarrow 0 \implies \int_0^{\pi} |f(x) - \sum a_k \cos(kx)|^2 dx \rightarrow 0$$

Часть II

Линейные функционалы

38. Теорема Рисса о представлении линейного функционала для вещественного пространства.

Теорема 5 (Рисс). H — гильбертово пространство

1. $y \in H$ — фиксирован, $f_y : H \rightarrow \mathbb{C} : f_y(x) = (x, y)$

$$f_y \in H^*, \quad \|f_y\|_{H^*} = \|y\|_H$$

2. $f \in H^*$

$$\exists! y \in H : f = f_y$$

Доказательство.

1. $y \in H$

- Проверим, что $f_y \in \mathcal{L}in(H, \mathbb{C})$
 $\alpha \in \mathbb{C}, \quad x, y \in H$

$$f_y(\alpha x + z) = (\alpha x + z, y) = \alpha(x, y) + (z, y) = \alpha f_y(x) + f_y(z)$$

- Оценим $\|f_y\|$

$$\|f_y\| = |(x, y)| \underset{\text{К-Б}}{\leq} \|y\| \cdot \|x\| \implies \|f_y\| \leq \|y\| \implies f_y \in H^*$$

- Если $y = 0$, то $f_y(x) = 0 \implies f_y = \mathbb{O}, \quad \|f_y\| = 0$
- $y \neq 0$

$$\|f_y\| = \sup_{x \neq 0} \frac{|f_y(x)|}{\|x\|} \geq \frac{|f_y(y)|}{\|y\|} = \frac{(y, y)}{\|y\|} = \|y\|$$

2. $f \in H^*$

- Если $f = \mathbb{O}$, т. е. $f(x) \equiv 0$, то $f = f_0$
- $f \neq \mathbb{O}$

Рассмотрим $N = \text{Ker } f \neq H$

$$H = N \oplus N^\perp, \quad N^\perp \neq \{0\}$$

Возьмём $y_0 \in N^\perp$. Докажем, что $\dim N^\perp = 1$.

$$\begin{aligned} f(y_0) &\neq 0 \\ v &:= \frac{y_0}{f(y_0)} \implies f(v) = 1 \end{aligned}$$

Возьмём $z \in N^\perp$. Докажем, что z пропорционально v .

$$u := z - f(z)v \implies u \in N^\perp$$

$$f(u) = f(z) - f(z) \underbrace{f(v)}_1 = 0 \implies u \in N$$

Значит, $u = 0 \implies z = f(z)v$.

Будем искать y в виде $y = \alpha v$, где $\alpha \in \mathbb{C}$.

$$1 = f_y(v) = f_y(v) = (v, \alpha v) = \alpha \|v\|^2 \implies \alpha = \frac{1}{\|v\|^2} \implies y = \frac{v}{\|v\|^2}$$

- Проверим единственность
Пусть $f = f_y, f = f_z$.

$$\forall x \in H \quad f_y(x) = f_z(x) \implies (x, y) = (x, z) \implies (x, y - z) = 0 \implies y - z \in H^\perp = \{0\}$$

□

Замечание. $C : H \rightarrow H^* : C(y) = f_y$

Знаем, что $\|f_y\|_{H^*} = \|y\|_H$.

$$\begin{aligned}
C(y+z) &= f_{y+z} \\
\forall x \in H \quad f_{y+z}(x) &= (x, y+z) = (x, y) + (x, z) = f_y + f_z \\
C(y+z) &= C(y) + C(z)
\end{aligned}$$

Возьмём $\alpha \in \mathbb{C}$.

$$\begin{aligned}
C(\alpha y) &= f_{\alpha y} \\
f_{\alpha y}(h) &= (x, \alpha y) = \bar{\alpha}(x, y)
\end{aligned}$$

C — сопряжённо-линейный изометрический изоморфизм между H и H^* . Говорят, что $H^* = H$, при этом имеют в виду, что $C(H) = H^*$.

39. Геометрический смысл линейного функционала. Теорема о норме линейного функционала

Теорема 6. X — линейное пространство над \mathbb{K}

$$1. f \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{K}), \quad f \neq \mathbb{O}, \quad L = \text{Ker } f$$

$$\text{codim } L = \dim(X/L) = 1$$

Это называется *коразмерность* L .

$$2. L \subset X, \quad \text{codim } L = 1, \quad x_0 \in X \setminus L$$

$$\exists! f \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{K}) : \quad L = \text{Ker } f, \quad f(x_0) = 1$$

Доказательство.

$$1. f \neq \mathbb{O} \implies \exists y_0 \notin L$$

$$v := \frac{y_0}{f(y_0)} \implies f(v) = 1$$

Возьмём $x \in X$.

$$\begin{aligned}
u := x - f(x)v &\implies f(u) = f(x) - f(x)f(v) = 0 \implies u \in L \implies \bar{u} = \bar{0} \implies \bar{0} = \bar{x} - f(x)\bar{v} \implies \\
&\implies \bar{x} = f(x)\bar{v} \implies X/L = \{ \alpha \bar{v} \mid \alpha \in \mathbb{K} \} \implies \dim(X/L) = 1
\end{aligned}$$

$$2. L : \quad \dim(X/L) = 1$$

Возьмём $x \in X$.

$$\exists \alpha \in \mathbb{K} : \bar{x} = \alpha \cdot \bar{x}_0$$

Определим $f(x) = \alpha$.

$$\bar{x}_0 = 1 \cdot \bar{x}_0 \implies f(x_0) = 1$$

Проверим, что $f \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{K})$. Возьмём $\alpha \in \mathbb{K}$, $x, y \in X$.

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \beta \bar{v} \\ \bar{y} &= \gamma \bar{v} \end{aligned} \right\} \implies \alpha \bar{x} + \bar{y} = (\alpha\beta + \gamma) \bar{v} \implies f(\alpha x + y) = \alpha\beta + \gamma = \alpha f(x) + f(y)$$

$$f(x) = 0 \iff \bar{x} = 0 \cdot \bar{v} = \bar{0} \iff x \in L \implies \text{Ker } f = L$$

Проверим единственность. Пусть $\exists g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{K}), \quad \text{Ker } g = L, \quad g(x_0) = 1$.

$$\forall x \in X \quad x = \alpha \cdot \bar{x}_0 \implies x = \alpha x_0 + y, \quad y \in L \implies \begin{cases} f(x) = \alpha \\ g(x) = \alpha \end{cases}$$

□

Замечание. В условиях второго пункта

$$f^{-1}(1) = x_0 + L = \{x_0 + y \mid y \in L\}$$

Доказательство. Обозначим $M = f^{-1}(1)$.

- $z \in x_0 + L$, т. е. $z = x_0 + y$, $y \in L$

$$f(z) = \underbrace{f(x_0)}_1 + \underbrace{f(y)}_0 = 1 \implies z \in M \implies x_0 + L \subset M$$

- $z \in M$

$$f(z) = 1 \implies f(z - x_0) = 0 \implies z - x_0 \in L \implies z - x_0 = y \implies z = x_0 + y \in x_0 + L \implies M \subset x_0 + L$$

□

Теорема 7 (норма линейного функционала). $(X, \|\cdot\|)$, $f \in X^*$, $f \neq \mathbb{O}$, $f(x_0) = 1$, $L = \text{Ker } f$

$$\|f\| = \frac{1}{\rho(x_0, L)}$$

Доказательство. Обозначим $d = \rho(x_0, L) = \inf \|x_0 - y\|$.

- $1 = f(x_0) = f(x_0 - y) \leq \|f\| \cdot \|x_0 - y\| \quad \forall y \in L \implies 1 \leq \|f\| \inf \|x_0 - y\| = \|f\|d \implies \frac{1}{d} \leq \|f\|$
- $x \in X \setminus L$, $f(x) \neq 0$

$$\begin{aligned} f\left(\frac{x}{f(x)}\right) = 1 \implies f\left(x_0 - \frac{x}{f(x)}\right) = 0 \implies x_0 - \frac{x}{f(x)} \in L \implies \left\|x_0 - \left(x_0 - \frac{x}{f(x)}\right)\right\| \geq d &\iff \\ \iff \frac{\|x\|}{\|f(x)\|} \geq d \implies |f(x)| \leq \frac{1}{d}\|x\| \implies \|f\| \leq \frac{1}{d} \end{aligned}$$

□

Замечание. В обозначениях теоремы $M = f^{-1}(1)$

$$\rho(x_0, L) = \rho(0, M)$$

Доказательство.

$$\rho(x_0, L) = \inf \|x_0 - y\|$$

$$\rho(0, M) = \rho(0, x_0 + L) = \inf \|x_0 + y\| = \inf \|x_0 - y\| = \rho(x_0, L)$$

□

40. Формулировка теоремы Хана—Банаха о продолжении линейного функционала для вещественного пространства. Продолжение линейного функционала с подпространства на линейную оболочку подпространства и вектора

Определение 1. X — линейное пространство над \mathbb{K}

$p : X \rightarrow \mathbb{K}$ называется *выпуклым функционалом*, если

1. $p(x + y) \leq p(x) + p(y)$;
2. $p(tx) = tp(x)$ при $t \geq 0$.

Теорема 8 (Хан—Банах). X — линейное над \mathbb{R} , $p : X \rightarrow \mathbb{R}$ — выпуклый функционал, L — подпро-

пространство X , $f \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{R})$, $f(x) \stackrel{L}{\leq} p(x)$ (говорят, что f подчинён p)

$$\exists g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R}) : \begin{cases} g|_L = f \\ g(x) \stackrel{X}{\leq} p(x) \end{cases}$$

Доказательство.

1. Возьмём $z \in X \setminus L$

$$L_1 := \mathcal{L}\{L, z\} = \{tx + z \mid t \in \mathbb{R}\}$$

Построим $f_1 \in \mathcal{L}in(L_1, \mathbb{R})$: $f_1|_L = f$, $f_1(y) \stackrel{L_1}{\leq} p(y)$.

$$f_1(z) := c$$

Позднее докажем, что можно выбрать такой c .

$$f_1(x + tz) = f(x) + tc$$

Далее продолжение тоже будем обозначать f .

$$f(y) \stackrel{L_1}{\leq} p(y) \iff f(x) + tc \stackrel{L}{\leq} p(x + tc) \iff \begin{cases} f(x) + tc \leq p(x + tz), & t > 0, \\ f(x) - tc \leq p(x - tz), & t > 0 \end{cases}$$

Разделим на t :

$$\begin{cases} f\left(\frac{x}{t}\right) + c \leq p\left(\frac{x}{t} + z\right), \\ f\left(\frac{x}{t}\right) - c \leq p\left(\frac{x}{t} - z\right) \end{cases}$$

Обозначим $u = \frac{x}{t}$, $v = \frac{x}{t}$ (никак друг с другом не связанные).

$$\begin{cases} f(u) + c \leq p(u + z) & \forall u \in L, \\ f(v) - c \leq p(v - z) & \forall v \in L \end{cases}$$

$$f(v) - p(v - z) \leq c \leq p(u + z) - f(u)$$

$$A := \{p(u + z) - f(u)\}_{u \in L} \subset \mathbb{R}, \quad B := \{f(v) - p(v - z)\}_{v \in L} \subset \mathbb{R}$$

Проверим, что $\forall a \in B \quad \forall b \in B \quad b \leq a$.

$$b \leq a \iff f(v) - p(v - z) \leq p(u + z) - f(u) \iff \underbrace{f(u) + f(v)}_{f(u+v) \in L} \leq p(u + z) + p(v - z)$$

f подчинён p , значит,

$$f(u + v) \leq p(u + v) \stackrel{\text{выпуклость}}{\leq} p(u + z) + p(v - z) \implies \exists c \in \mathbb{R} : f_1(z) = c$$

□

41. Лемма Цорна. Доказательство теоремы Хана—Банаха для вещественного пространства (без доказательства возможности продолжения линейного функционала с подпространства на линейную оболочку подпространства и вектора)

Определение 2. P полуупорядочено
 x — максимальный элемент P , если

$$\forall y \in P \quad x \leq y \implies x = y$$

Лемма 1 (Цорн). P частично упорядочено

Если для любой цепи имеется верхняя грань, то во всём множестве P существует максимальный элемент.

Теорема 9 (Хан—Банах). X — линейное над \mathbb{R} , $p : X \rightarrow \mathbb{R}$ — выпуклый функционал, L — подпространство X , $f \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{R})$, $f(x) \leq_L p(x)$ (говорят, что f подчинён p)

$$\exists g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R}) : \begin{cases} g|_L = f \\ g(x) \leq_X p(x) \end{cases}$$

Доказательство.

2. $\mathcal{P} := \{ (M, h) \}$, $L \subset M \subset X$, M — подпр-во, $h \in \mathcal{L}in(M, \mathbb{R})$, $h|_L = f$, $h(x) \leq^M p(x)$

Определим порядок:

$$(M, h) \leq (M_1, h_1) \iff \begin{cases} M \subset M_1, \\ h_1|_M = h \end{cases}$$

Пусть A — цепь в \mathcal{P} , т. е.

$$A = \{ (M_\alpha, h_\alpha) \}_{\alpha \in I} : \forall \alpha, \beta \in I \quad \begin{cases} (M_\alpha, h_\alpha) \leq (M_\beta, h_\beta) \\ (M_\beta, h_\beta) \leq (M_\alpha, h_\alpha) \end{cases}$$

Построим верхнюю грань для A .

$$M_0 := \bigcup_{\alpha \in I} M_\alpha$$

Проверим, что M_0 — подпространство. Пусть $x, y \in M_0$.

$$\exists \alpha, \beta : x \in M_\alpha, y \in M_\beta \implies \begin{cases} M_\alpha \subset M_\beta, \\ M_\beta \subset M_\alpha \end{cases}$$

Пусть выполняется первое.

$$\implies x, y \in M_\beta \text{ — подпространство} \implies ax + by \in M_\beta \subset M_0 \implies M_0 \text{ — подпространство}$$

Определим $h_0 : M_0 \rightarrow \mathbb{R}$.

Возьмём $x \in M_0$.

$$\exists \alpha : x \in M_\alpha$$

Положим $h_0(x) = h_\alpha(x)$.

Проверим корректность. Пусть $x \in M_\beta$.

$$\begin{cases} (M_\alpha, h_\alpha) \leq (M_\beta, h_\beta), \\ (M_\beta, h_\beta) \leq (M_\alpha, h_\alpha) \end{cases}$$

Пусть выполнено первое.

$$x \in M_\alpha, x \in M_\beta \implies h_\beta(x) = h_\alpha(x) = h_0(x)$$

Можно проверить, что $h_0 \in \mathcal{L}in(M_0, \mathbb{R})$.

$$\forall \alpha \in I \quad (M_\alpha, h_\alpha) \leq (M_0, h_0) \implies (M_0, h_0) \text{ — верхняя грань для } A$$

По лемме Цорна, в \mathcal{P} существует максимальный элемент (M, h) .

$$L \subset M, \quad h|_L = f, \quad h(x) \leq^M p(x)$$

Докажем, что $M = X$. Пусть $\exists z \in X \setminus M$.

$$M_1 := \mathcal{L}in \{ M, z \}$$

По первой части доказательства

$$\exists h_1 \in \mathcal{L}in(M_1, \mathbb{R}) : \quad h_1|_M = h, \quad h_1(x) \stackrel{M_1}{\leq} p(x)$$

$$\implies (M_1, h_1) \in \mathcal{P}$$

$$(M, h) \leq (M_1, h_1), \quad M \subsetneq M_1$$

Это противоречит максимальнойности (M, h) .

□

Утверждение 1. X линейно над \mathbb{R} , p — выпуклый функционал, $f \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R})$, $f(x) \stackrel{X}{\leq} p(x)$

$$f(x) \geq -p(-x)$$

Доказательство. $f(x) \leq p(x) \implies f(-x) \leq p(-x) \implies -f(x) \leq p(-x)$

□

Утверждение 2. p — полунорма, $f(x) \stackrel{X}{\leq} p(x)$

$$|f(x)| \leq p(x)$$

Доказательство. $p(-x) \stackrel[p \text{ — полунорма}]{=} p(x) \implies f(x) \geq -p(x)$

□

42. Обобщённый предел в пространстве ограниченных последовательностей

Теорема 10. $l_{\mathbb{R}}^{\infty} = \left\{ x = \{ x_n \in \mathbb{R} \}_{n=1}^{\infty} \mid \|x\| = \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n| < +\infty \right\}$

$$\exists L \in (l^{\infty})^* : \quad \|L\|_{(l^{\infty})^*} = 1, \quad \forall x = \{ x_n \}_{n=1}^{\infty} \in l^{\infty} \quad \varliminf_{n \rightarrow \infty} x_n \leq L(x) \leq \varlimsup_{n \rightarrow \infty} x_n$$

В частности, если $\exists \lim x_n = x_0$, то $L(x) = x_0$.

Доказательство. Для $x \in l^{\infty}$ положим $p(x) = \varlimsup_{n \rightarrow \infty} x_n$.

Докажем, что p — выпуклый функционал:

- $t > 0 \implies p(tx) = tp(x)$ — очевидно;
- $p(x + y) \leq p(x) + p(y)$

$$\varlimsup x_n + \varlimsup y_n \stackrel{?}{\leq} \varlimsup (x_n + y_n)$$

Вспомним определение верхнего предела:

$$a_n := \sup_{m \geq n} \{ x_m \} \implies a_n \searrow \implies \exists \lim a_n = a, \quad \varlimsup x_n := a$$

$$b_n = \sup_{m \geq n} \{ y_m \}, \quad b = \varlimsup y_n$$

$$c_n = \sup \{ x_m + y_m \}, \quad c = \varlimsup \{ x_n + y_n \}$$

Зафиксируем n .

$$\forall m \geq n \quad x_m + y_m \leq a_n + b_n \implies c_n \leq a_n + b_n$$

Устремим $n \rightarrow \infty$:

$$c \leq a + b$$

$$C \subset l^\infty, \quad C := \{ x = \{ x_n \}_{n=1}^\infty \mid \exists \lim x_n = x_0 \}$$

Определим $f : C \rightarrow \mathbb{R} : f(x) = \lim x_n = x_0$.

$$f(x) = \lim x_n \leq \overline{\lim} x_n \implies f(x) \stackrel{C}{\leq} p(x)$$

Применим теорему Хана—Банаха:

$$\exists g \in \mathcal{L}in(l^\infty, \mathbb{R}), \quad g(x) \stackrel{C}{=} f(x), \quad g(x) \stackrel{l^\infty}{\leq} \overline{\lim} x_n$$

По утв. 1

$$g(x) \geq -p(-x) = -\overline{\lim}(-x_n) \stackrel{\text{задача из Демидовича}}{=} \underline{\lim} x_n$$

$g = L$ — в теореме, $g \in \mathcal{L}in(l^\infty, \mathbb{R})$.

$$\left. \begin{aligned} g(x) &\leq \overline{\lim} x_n \leq \sup |x_n| \\ g(x) &\geq \underline{\lim} x_n \geq -\sup |x_n| \end{aligned} \right\} \implies |g(x)| \leq \|x\|_\infty \implies \|g\| \leq 1 \implies g \in (l^\infty)^*$$

Возьмём $x = \{ 1, 1, \dots \}$.

$$\|x\| = 1, \quad |g(x)| = 1 \implies \|g\| \geq \frac{|g(x)|}{\|x\|} = 1 \implies \|g\| = 1$$

□

43. Теорема Боненблуста—Собчика о продолжении линейного функционала для комплексного пространства

Теорема 11 (Боненблуст—Собчик). X линейно над \mathbb{C} , p — полунорма, L — подпространство X , $f \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{C})$, $|f(x)| \stackrel{L}{\leq} p(x)$

$$\exists g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{C}) : \begin{cases} g|_L = f, \\ |g(x)| \stackrel{X}{\leq} p(x) \end{cases}$$

Доказательство (овеществление). X линейно и над \mathbb{R} , т. е.

$$\left. \begin{aligned} a, b &\in \mathbb{R} \\ x, y &\in X \end{aligned} \right\} \implies ax + by \in X$$

Также, L — подпространство и в вещественном смысле.

$$f(x) = u(x) + \mathrm{i}v(x), \quad u(x), v(x) \in \mathbb{R}$$

Проверим, что $u, v \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{R})$. Пусть $x, y \in L$.

$$f(x) = u(x) + \mathrm{i}v(x), \quad f(y) = u(y) + \mathrm{i}v(y)$$

$$f(x+y) = u(x+y) + \mathrm{i}v(x+y)$$

Сложим первые два равенства:

$$f(x+y) = (u(x) + u(y)) + \mathrm{i}(v(x) + v(y))$$

Вещественные и мнимые части равны:

$$u(x+y) = u(x) + u(y), \quad v(x+y) = v(x) + v(y)$$

Возьмём $x \in X$, $a \in \mathbb{R}$.

$$f(x) = u(x) + \mathrm{i}v(x)$$

$$f(ax) = u(ax) + iv(ax)$$

$$f(ax) = af(x) = au(x) + iav(x) \implies \begin{cases} u(ax) = au(x) \\ v(ax) = av(x) \end{cases}$$

$$\implies u, v \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{R})$$

$$f \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{C}) \implies f(ix) = if(x) \implies u(ix) + iv(ix) = i(u(x) + iv(x)) \implies u(ix) = -v(x)$$

Применим теорему Хана–Банаха к u , а v определим из этого тождества.

$$u(x) \leq |f(x)| \leq p(x) \quad \forall x \in L \xrightarrow[\text{т. Хана–Банаха}]{\implies}$$

$$\implies \exists \varphi \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R}) : \begin{cases} \varphi|_L = u, \\ \varphi(x) \leq p(x) \end{cases} \xrightarrow[p\text{-полуорма}]{\implies} |\varphi(x)| \stackrel{L}{\leq} p(x)$$

$$x \in X \quad \psi(x) := -\varphi(ix) \implies \psi \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R}) \quad (1)$$

$$g(x) := \varphi(x) + i\psi(x) \implies g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{R}), \quad g(x) \stackrel{L}{=} f(x)$$

$$g(ix) = \varphi(ix) + i\psi(ix) \stackrel{(1)}{=} i(\varphi(x) + i\psi(x)) \implies g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{C})$$

Проверим подчинение.

$$x \in X, \quad g(x) \in \mathbb{C} \quad g(x) = re^{i\theta}, \quad r \geq 0, \quad \theta \in \mathbb{R}$$

$$\implies |g(x)| = r = g(xe^{-i\theta}) = \varphi(xe^{-i\theta}) + i\psi(xe^{-i\theta})$$

Слева вещественное число, справа — комплексное, значит, мнимая часть равна нулю:

$$|g(x)| = \varphi(xe^{-i\theta}) \leq p(xe^{-i\theta}) \xrightarrow[p\text{-полуорма}]{\implies} p(x)$$

□

44. Теорема Хана–Банаха для нормированного пространства.

Следствия: о достаточном числе линейных функционалов, формула для нормы элемента пространства, формула для расстояния до подпространства, критерий полноты системы элементов

Теорема 12. $(X, \|\cdot\|)$ над \mathbb{K} , L — подпространство X в алгебраическом смысле, $f \in L^*$

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} g|_L = f, \\ \|g\|_{X^*} = \|f\|_{L^*}. \end{cases}$$

Доказательство. Обозначим $M = \|f\|_{L^*}$.

$$p(x) := M \cdot \|x\| \implies p\text{ — норма на } X$$

Возьмём $x \in L$.

$$|f(x)| \leq \|f\|_{L^*} \|x\| = M \|x\| = p(x) \implies f \text{ подчинён } p$$

Применяем теорему Хана–Банаха или Бонеблюста–Собчика:

$$\exists g \in \mathcal{L}in(X, \mathbb{K}) : \begin{cases} g|_L = f, \\ |g(x)| \stackrel{X}{\leq} p(x) \end{cases}$$

$$\implies |g(x)| \stackrel{X}{\leq} M \cdot \|x\| \implies \|g\|_{X^*} \implies g \in X^*$$

$$\|g\|_{X^*} = \sup_{\substack{x \in X \\ \|x\| \leq 1}} |g(x)| \geq \sup_{\substack{x \in L \\ \|x\| \geq 1}} |g(x)| = \|f\|_{L^*}$$

□

Следствие (о достаточном множестве линейных функционалов). $(X, \|\cdot\|)$ над \mathbb{K} , $x_0 \in X$

1.

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} \|g\| = 1, \\ g(x_0) = \|x_0\|; \end{cases}$$

2. $\|x_0\| = \max\{|h(x_0)| \mid \|h\|_{X^*} \leq 1\}$.

Доказательство.

- $x_0 \neq 0$

Рассмотрим $L = \{\alpha x_0\}_{\alpha \in \mathbb{K}}$. Определим $f : L \rightarrow \mathbb{K} : f(\alpha x_0) = \alpha \|x_0\|$.

Понятно, что $f \in \mathcal{L}in(L, \mathbb{K})$, $f(x_0) = \|x_0\|$, $|f(\alpha x_0)| = |\alpha| \|x_0\|$.

$$\implies \|f\|_{L^*} = 1$$

По теореме

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} \|g\|_{X^*} = 1, \\ g(x_0) = \|x_0\|. \end{cases}$$

Рассмотрим $h \in X^* : \|h\| \leq 1$.

$$|h(x_0)| \leq \|h\| \|x_0\| \leq \|x_0\| \implies \sup_{\|h\| \leq 1} |h(x_0)| \leq \|x_0\|$$

$$\text{Но } \exists g : \begin{cases} \|g\| = 1, \\ |g(x_0)| = \|x_0\|. \end{cases}$$

- $x_0 = 0$

Возьмём $g \in X^* : \|g\| = 1$.

$$g(x_0) = 0$$

□

Следствие (расстояние до подпространства). $(X, \|\cdot\|)$, L — замкнутое подпространство X , $x_0 \in X \setminus L$, $d := \rho(x_0, L)$

1.

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} \|g\| = 1, \\ g(x_0) = d, \\ g|_L = 0; \end{cases}$$

2. $d = \min\{|h(x_0)| \mid \|h\| \leq 1, h|_L = 0\}$.

Доказательство. $M := \mathcal{L}in(x_0, L) = \{\alpha x_0 + y \mid y \in L\}$

Определим $f : M \rightarrow \mathbb{K} : f(\alpha x_0 + y) = \alpha$.

$$\implies f(y) = 0 \quad \forall y \in L$$

$$f(x_0) = 1$$

Понятно, что $f \in \mathcal{L}in(M, \mathbb{K})$.

Воспользуемся теоремой о норме линейного функционала:

$$\|f\|_{M^*} = \frac{1}{d}$$

$$f_1 := df \implies \|f_1\| = 1, \quad f_1(x_0) = d$$

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} \|g\| = 1, \\ g|_M = f_1 \end{cases} \implies g|_L = 0, \quad g(x_0) = d$$

Возьмём $h \in X^* : \|h\| \leq 1, h|_L = 0$.

$$|h(x_0)| = |h(x_0 - y)| \leq \|h\| \cdot \|x_0 - y\| \leq \|x_0 - y\| \quad \forall y \in L$$

$$\implies |h(x_0)| \leq d \implies \sup_{\substack{\|h\| \leq 1 \\ h|_L = 0}} |h(x_0)| \leq d$$

$$\exists g : \begin{cases} g(x_0) = d, \\ g|_L = 0, \\ \|g\| \leq 1. \end{cases}$$

$$\implies d = \max_{\substack{\|h\| \leq 1 \\ h|_L = 0}} |h(x_0)|$$

□

Замечание. Если $L = \{0\}$, то получим предыдущее следствие.

Следствие (критерий полноты семейства элементов в нормированном пространстве).

$(X, \|\cdot\|), \quad \{x_\alpha \in X\}_{\alpha \in A}$

$\{x_\alpha\}$ — полная система элементов **тогда и только тогда**, когда

$$\left(f \in X^* \quad f(x_\alpha) = 0 \quad \forall \alpha \in A \right) \implies f = 0$$

Доказательство. $L := \overline{\mathcal{L}\{x_\alpha\}_{\alpha \in A}}$

• \implies

$\{x_\alpha\}$ — полное, $f \in X^*, \quad f(x_\alpha) = 0$

$$x = \sum_{k=1}^n c_k x_{\alpha_k} \implies f(x) = 0$$

То есть, $\forall x \in \mathcal{L}\{x_\alpha\} \quad f(x) = 0$.

Возьмём $x \in X$.

$$\exists \{x_n \in \mathcal{L}\{x_\alpha\}\}_{n=1}^\infty : \quad \lim x_n = x$$

f непрерывна $\implies f(x) = \lim f(x_n) = 0 \implies f = 0$.

• \Leftarrow

Пусть $L \subsetneq X$, т. е. $\exists x_0 \neq 0 \in X \setminus L$. По первому следствию

$$\exists g \in X^* : \begin{cases} \|g\| = 1, \\ g(x_0) = \|x_0\| \end{cases} \implies g \neq 0$$

При этом, $g|_L = 0 \implies g(x_\alpha) = 0$ — \nexists .

□

45. Сепарабельность пространства, у которого сопряжённое пространство сепарабельно

Теорема 13. $(X, \|\cdot\|)$

Если X^* сепарабельно, то X сепарабельно.

Доказательство. X^* сепарабельно $\iff \exists \{f_n\}_{n=1}^\infty : f_n$ плотны в X^* , т. е.

$$\forall f \in X^* \quad \exists \{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty : \quad \lim \|f - f_{n_k}\| = 0$$

Пусть $f \in X^*$.

$$\|f\| = \sup_{\|x\|=1} |f(x)| \implies \exists x : \begin{cases} \|x\| = 1, \\ \|f\| \leq 2|f(x)| \end{cases}$$

Пусть теперь $f \neq \mathbb{O}$.

$$\exists \{x_n\} : \quad \|x_n\| = 1, \quad \|f_n\| \leq 2|f_n(x_n)|$$

Проверим, что $\{x_n\}$ полна в X (по следствию 3). Пусть $f \in X^*, \quad f(x_n) = 0 \quad \forall n$.

$$\exists f_{n_k} \in X^* : \quad \lim \|f - f_{n_k}\| = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\|f_{n_k}\| &\leq |f_{n_k}(x_{n_k})| = \underbrace{|f(x_{n_k}) - f_{n_k}(x_{n_k})|}_0 \leq \|f - f_{n_k}\| \cdot \underbrace{\|x_{n_k}\|}_1 \\ &\implies \lim \|f_{n_k}\| = 0 \implies f = \mathbb{O} \implies \{x_n\} \text{ полна} \end{aligned}$$

□

46. Принцип равномерной ограниченности. Сильная сходимост линейных операторов, оценка нормы сильного предела

Лемма 2. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), \quad U \in \mathcal{L}in(X, Y)$

$$\exists a \in X \quad \exists \varepsilon > 0 \quad \exists R > 0 : \quad U(B_\varepsilon(a)) \subset \overline{B_R(0)} \implies \begin{cases} U \in \mathcal{B}(X, Y), \\ \|U\| \leq \frac{2R}{\varepsilon} \end{cases}$$

Доказательство. Возьмём $z \in X : \quad \|z\| < \varepsilon$.

$$\begin{aligned} a + z \in B_\varepsilon(a) &\implies U(a + z) \in \overline{B_R(0)} \implies \begin{cases} \|U(a + z)\| \leq R, \\ \|U(a)\| \leq R \end{cases} \xrightarrow[z=(a+z)-a]{=} \\ &\implies \|Uz\| \leq \|U(a + z)\| + \|U(a)\| \leq 2R \end{aligned}$$

Возьмём $x \in X : \quad \|x\| < 1$.

$$z = \varepsilon x \implies \|\varepsilon x\| < \varepsilon \implies \|U(\varepsilon x)\| \leq 2R \implies \|Ux\| \leq \frac{2R}{\varepsilon} \xrightarrow[\|x\| \leq 1]{\|U\| = \sup \|Ux\|} \|U\| \leq \frac{2R}{\varepsilon}$$

□

Теорема 14. X — банахово, $(Y, \|\cdot\|), \quad \{U_\alpha \in \mathcal{B}(X, Y)\}_{\alpha \in A}, \quad \forall x \quad \sup_{\alpha \in A} \|U_\alpha x\| < +\infty$

$$\sup_{\alpha \in A} \|U_\alpha\| < +\infty$$

Доказательство. Нужно доказать, что $\sup_{\|x\| \leq 1} \sup_{\alpha} \|U_\alpha x\| < +\infty$.

$$Y_n := \{y \mid \|y\| \leq n\} \subset Y$$

$U_\alpha^{-1}(Y_n)$ замкнуто, т. к. U_α непрерывен.

$$E_n = \bigcap_{\alpha \in A} U_\alpha^{-1}(Y_n)$$

E_n замкнуты.

Пусть $x \in X$.

$$\exists n \in \mathbb{N} : \sup_{\alpha \in A} \|U_\alpha x\| < n \implies x \in U_\alpha^{-1}(Y_n) \xRightarrow{\forall \alpha \in A} x \in E_n \implies X = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$$

Применим теорему Бэра о категориях:

$$\exists n_0 : \text{Int } E_{n_0} \neq \emptyset$$

То есть,

$$\exists B_\varepsilon(a) \subset E_{n_0} \implies B_\varepsilon(a) \in U_\alpha^{-1}(Y_{n_0}) \quad \forall \alpha \in A \implies U_\alpha(B_\varepsilon(a)) \subset Y_{n_0} \xRightarrow{\text{лемма}} \|U_\alpha\| \leq \frac{2n_0}{\varepsilon} \quad \forall \alpha \in A$$

□

Следствие (Принцип фиксации особенности). X — банахово, $(Y, \|\cdot\|)$, $\{U_\alpha \in \mathcal{B}(X, Y)\}$, $\sup_{\alpha \in A} \|U_\alpha\| = +\infty$

$$\exists x_0 \in X : \sup_{\alpha \in A} \|U_\alpha x_0\| = +\infty$$

Определение 3. $(X, \|\cdot\|)$, $(Y, \|\cdot\|)$, $\{U_n \in \mathcal{L}in(X, Y)\}_{n=1}^{\infty}$, $\forall x \in X \quad \exists \lim_{n \rightarrow \infty} U_n x =: Ux$
 $U = \text{s-lim } U_n$ — *сильный (поточечный) предел* U_n .

Свойства.

$$1. U_n \in \mathcal{L}in(X, Y)$$

$$U = \text{s-lim } U_n \implies U \in \mathcal{L}in(X, Y)$$

$$2. U_n, U \in \mathcal{B}(X, Y)$$

$$\lim \|U - U_n\| = 0 \implies Ux = \text{s-lim } U_n x$$

Доказательство.

1. Очевидно.

2. $x \in X$

$$\|Ux - U_n x\| \leq \underbrace{\|U - U_n\|}_{\rightarrow 0} \cdot \|x\| \implies \lim U_n x = Ux$$

□

Замечание. Если $U = \text{s-lim } U_n$, $U, U_n \in \mathcal{B}(X, Y)$, то **не обязательно** $\lim \|U - U_n\| = 0$.

Пример. $X = l^1$

$$x = \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \in l^1$$

$$f_n(x) := x_n, \quad \|f_n(x)\| = |x_n| \leq \|x_n\|_1 \implies \|f_n\| \leq 1 \implies f_n \in (l^1)^*$$

Пусть $e_n = (0, \dots, 0, \underset{n}{1}, 0, \dots, 0)$.

$$f_n(e_n) = 1 \implies \|f_n\| \geq 1$$

Найдём сильный предел:

$$\lim x_n = 0 \implies \lim f_n(x) = 0 \quad \forall x \in l^1 \implies \mathbb{O} = \text{s-lim } f_n$$

$$\|f - \mathbb{O}\| = 1, \quad \lim \|f_n - \mathbb{O}\| = 1 \neq 0$$

Следствие. X — банахово, $(Y, \|\cdot\|)$, $\{U_n\}_{n=1}^{\infty}$, $U_n \in \mathcal{B}(X, Y)$, $U = \text{s-lim } U_n$

$$U \in \mathcal{B}(X, Y), \quad \|U\| \leq \liminf \|U_n\|$$

Доказательство.

$$\exists \lim U_n x \implies \sup_{n \in \mathbb{N}} \|U_n x\| < +\infty \xrightarrow{\text{теорема}} \exists M > 0 : \|U_n\| \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

$$b := \varliminf \|U_n\| \in \mathbb{R}, \quad b \leq M$$

$$\exists \{n_k\} : b = \lim_{k \rightarrow \infty} \|U_{n_k}\| \implies Ux = \lim U_{n_k} x \quad \forall x \in X$$

$$\|Ux\| = \lim_{k \rightarrow \infty} \|U_{n_k} x\| \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \|U_{n_k}\| \cdot \|x\| = b\|x\| \implies \|U\| \leq b$$

□

Замечание. $U = s\text{-}\lim U_n$

Возможно строгое неравенство (в примере так и было).

47. Теоремы Банаха—Штейнгауза: критерий сходимости операторов

Теорема 15 (Банах—Штейнгауз). X, Y — банаховы, $\{U_n \in \mathcal{B}(X, Y)\}_{n=1}^\infty$

Существует сильный предел U_n тогда и только тогда, когда

1. $\exists M > 0 : \|U_n\| \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$;
2. $\{U_n x\}_{n=1}^\infty$ фундаментальна для $\forall x \in E \subset X$, где E — полное в X , т. е. $\overline{\mathcal{L}\{E\}} = X$.

Доказательство.

• \implies

1. уже доказано;
2. очевидно.

• \impliedby

Проверим, что $\forall x \in X \quad \{U_n x\}$ фундаментальна.

Обозначим $L = \mathcal{L}\{E\}$. Возьмём $x \in L$.

$$x = \sum_{k=1}^m c_k x_k, \quad x_k \in E$$

Пусть $p > q \in \mathbb{N}$.

$$\|U_p x - U_q x\| \leq \sum_{k=1}^m |c_k| \underbrace{\|U_p x_k - U_q x_k\|}_{\rightarrow 0} \xrightarrow{p, q \rightarrow \infty} 0$$

$\implies \{U_n x\}$ фундаментальна для $x \in L$.

Возьмём произвольный $x \in X$.

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists z \in L : \|x - z\| < \varepsilon$$

Воспользуемся тем, что $\{U_n z\}$ фундаментальна:

$$\exists N \in \mathbb{N} : \forall n > m \geq N \quad \|U_n z - U_m z\| < \varepsilon$$

$$\|U_n x - U_m x\| \leq \underbrace{\|U_n x - U_n z\|}_{\leq \|U_n\| \cdot \|x - z\| \leq M\|x - z\| < M\varepsilon} + \underbrace{\|U_n z - U_m z\|}_{< \varepsilon} + \underbrace{\|U_m z - U_m x\|}_{< M\varepsilon} < \varepsilon(2M + 1)$$

$\implies \{U_n x\}_{n=1}^\infty$ фундаментальна для $\forall x \in X$.

$$\xrightarrow{Y \text{ — банахово}} \exists \lim U_n x =: U \quad \forall x \in X, \quad U = s\text{-}\lim U_n$$

□

Замечание. \Rightarrow верно для банахова X и нормированного Y .
 \Leftarrow верно для нормированного X и банахова Y .

Теорема 16 (Банах—Штейнгауз). X — банахово, $(Y, \|\cdot\|)$, $\{U_n \in \mathcal{B}(X, Y)\}_{n=1}^{\infty}$, $U \in \mathcal{B}(X, Y)$
 $U = s\text{-}\lim U_n$ тогда и только тогда, когда

1. $\exists M > 0 : \|U_n\| \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$;
2. $\exists \lim U_n x \quad \forall x \in E \subset X$, где E — полное в X .

Доказательство.

• \Rightarrow — уже доказано.

• $L := \mathcal{L}\{E\}$, $x \in L$

$$x = \sum_{k=1}^m c_k x_k, \quad x_k \in E$$

$$\exists \lim U_n x_k \quad \forall x_k \Rightarrow \exists \lim U_n x$$

Проверим, что $\forall x \in X \quad \exists \lim U_n x$.

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists z \in L : \|x - z\| < \varepsilon$$

$$\exists N : \quad \forall n \geq N \quad \|Uz - U_n z\| < \varepsilon$$

$$\begin{aligned} \|Ux - U_n x\| &\leq \underbrace{\|Ux - Uz\|}_{\leq \|U\| \cdot \|x - z\| < \|U\| \cdot \varepsilon} + \underbrace{\|Uz - U_n z\|}_{< \varepsilon} + \underbrace{\|U_n z - U_n x\|}_{\|U_n\| \cdot \|x - z\| < M\varepsilon} < \varepsilon(\|U\| + 1 + M) \\ &\Rightarrow \exists U_n x = Ux \end{aligned}$$

□

48. Обратный оператор к $I - A$, где A — сжатие. Множество обратных операторов открыто

Утверждение 3. $A, B \in \mathcal{B}(X)$

$$\|AB\| \leq \|A\| \cdot \|B\|$$

Доказательство.

$$\|A(Bx)\| \leq \|A\| \cdot \|Bx\| \leq \|A\| \cdot \|B\| \cdot \|x\|$$

□

Теорема 17. X — банахово, I — тождественный, $A \in \mathcal{B}(X)$, $\|A\| < 1$

$$\exists (I - A)^{-1}, \quad \|(I - A)^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - \|A\|}, \quad (I - A)^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} A^k$$

Доказательство. Проверим, что сумма норм операторов сходится. По утв. 3

$$\|A^k\| \leq \|A\|^k \Rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \|A^k\| \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|A\|^k = \frac{1}{1 - \|A\|}$$

X — банахово $\Rightarrow \mathcal{B}(X)$ — банахово. Воспользуемся критерием полноты:

$$\Rightarrow \exists S = \sum_{k=0}^{\infty} A^k \in \mathcal{B}(X)$$

$$S_n := \sum_{k=0}^n A^k$$

$$\|S_n\| \leq \sum_{k=0}^n \|A\|^k < \frac{1}{1 - \|A\|}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \|S - S_n\| = 0$$

$$\Rightarrow \|S\| \leq \frac{1}{1 - \|A\|}$$

$$(I - A)S_n = (I - A) \sum_{k=0}^n A^k = \sum_{k=0}^n A^k - \sum_{k=0}^n A^{k+1} = I - A^{n+1}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|A^{n+1}\| = 0 \Rightarrow \lim(I - A^{n+1}) = I$$

$$\left. \begin{aligned} \lim(I - A)S_n &= I \\ \lim(I - A)S_n &= (I - A)S \end{aligned} \right\} \Rightarrow (I - A)S = I \left\{ \begin{aligned} S_n(I - A) &= I - A^{n+1} \\ S(I - A) &= I \end{aligned} \right\} \Rightarrow S = (I - A)^{-1}$$

□

Определение 4. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|)$

Определим множество обратимых операторов:

$$\text{In}(X, Y) = \{ A \in \mathcal{B}(X, Y) \mid \exists A^{-1} \in \mathcal{B}(Y, X) \}$$

Теорема 18. X — банахово, $(Y, \|\cdot\|)$

1. $U \in \text{In}(X, Y), \quad V \in \mathcal{B}(X, Y),$

$$\|U - V\| < \frac{1}{\|U^{-1}\|}$$

$$\Rightarrow V \in \text{In}(X, Y),$$

$$\|V^{-1}\| \leq \frac{\|U^{-1}\|}{1 - \|U - V\| \cdot \|U^{-1}\|} \quad (2)$$

$$\|U^{-1} - V^{-1}\| \leq \frac{\|U^{-1}\|^2 \|U - V\|}{1 - \|U - V\| \cdot \|U^{-1}\|} \quad (3)$$

2. $\varphi : \text{In}(X, Y) \rightarrow \text{In}(Y, X) : \quad \varphi(A) = A^{-1}$

Тогда φ непрерывно.

Доказательство.

1. Рассмотрим оператор $W = U^{-1}(U - V)$.

$$\|W\| \leq \|U^{-1}\| \cdot \|U - V\| < 1, \quad W \in \mathcal{B}(X)$$

Можно применить предыдущую теорему:

$$\exists (I - W)^{-1}, \quad \|(I - W)^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - \|W\|} \leq \frac{1}{1 - \|U^{-1}\| \|U - V\|}$$

$$W = U^{-1}(U - V) = I - U^{-1}V \Rightarrow I - W = U^{-1}V$$

$$V = U(U^{-1}V) = U(I - W)$$

Каждый из них обратим, значит,

$$\exists V^{-1} = (I - W)^{-1}U^{-1}$$

$$\|V^{-1}\| \leq \|U^{-1}\| \cdot \|(I - W)^{-1}\| \leq \frac{\|U^{-1}\|}{1 - \|U^{-1}\| \cdot \|U - V\|}$$

Получили неравенство (2). Получим из него неравенство (3):

$$U^{-1} - V^{-1} = U^{-1}(V - U)V^{-1} \implies \|U^{-1} - V^{-1}\| \leq \|U^{-1}\| \|V - U\| \|V^{-1}\| \stackrel{(2)}{\leq} \frac{\|U^{-1}\|^2 \|U - V\|}{1 - \|U^{-1}\| \cdot \|U - V\|}$$

2. $\varphi(U) = U^{-1}$

$$\varphi(U) - \varphi(V) = U^{-1} - V^{-1} \stackrel{(3)}{\implies} \lim_{\|U - V\| \rightarrow 0} \|\varphi(U) - \varphi(V)\| = 0$$

□

49. Определение открытого отображения. Критерий открытости для линейного оператора. Условия существования непрерывного обратного оператора

Определение 5. $(X, \tau_1), (Y, \tau_2)$ — топологические пространства

Отображение $U : X \rightarrow Y$ *открыто*, если оно переводит открытые множества в открытые:

$$G \subset X \text{ открыто} \implies U(G) \text{ открыто}$$

Замечание. U непрерывно, если **прообраз** открытого множества открыт.

Утверждение 4. $(X, \tau_1), (Y, \tau_2)$ — топологические пространства, $U : X \rightarrow Y$ — биекция

$$U \text{ открыто} \iff U^{-1} \text{ непрерывно}$$

Утверждение 5. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), U \in \mathcal{L}in(X, Y)$

$$U \text{ открыт} \iff \exists r > 0 : B_r(0) \subset U(B_1(0))$$

Доказательство.

• \implies

$$\left. \begin{array}{l} U(0) = 0 \\ U \text{ открыто} \implies U(B_1(0)) \text{ открыто} \end{array} \right\} \implies 0 \in U(B_1(0)) \implies \exists r > 0 : B_r(0) \subset U(B_1(0))$$

• \Leftarrow

Возьмём $G \subset X$ — открытое. Пусть $y_0 \in U(G)$.

$$\exists x_0 \in G : Ux_0 = y_0$$

$$\exists R > 0 : B_R(x_0) \subset G$$

$$B_r(0) \subset U(B_1(0)) \xrightarrow{\text{линейность}} B_{rR}(0) \subset U(B_R(0))$$

Сдвинем на $U(x_0)$:

$$\underbrace{Ux_0 + B_{rR}(0)}_{B_{rR}(Ux_0) \subset U(B_R(x_0)) \subset U(G)} \subset Ux_0 + U(B_R(0)) = U(x_0 + B_R(0)) = U(B_R(x_0))$$

$$\implies Ux_0 \text{ — внутренняя точка } U(G).$$

□

Следствие. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), U \in \mathcal{L}in(X, Y)$

$$U \text{ открыто} \implies U(X) = Y, \text{ т. е. } U \text{ — сюръекция}$$

Доказательство. По критерию $\exists r > 0 : B_r(0) \subset U(B_1(0))$. Возьмём $y \in Y$.

$$\exists n \in \mathbb{N} : \|y\| < nr \implies y \in B_{nr}(0) \subset U(B_n(0)) \implies y \in U(X)$$

□

50. Теорема Банаха об открытом отображении

Лемма 3 (редукция). X — банахово, $(Y, \|\cdot\|)$, $U \in \mathcal{B}(X, Y)$, $\exists r > 0 : B_r(0) \subset \overline{U(B_1(0))}$

$$B_{\frac{r}{2}}(0) \subset U(B_1(0))$$

Доказательство. Пусть $y \in B_{\frac{r}{2}}(0)$, т. е. $\|y\| < \frac{r}{2}$. Докажем, что $\exists x : \|x\| < 1, Ux = y$.

$$B_r(0) \subset \overline{U(B_1(0))} \implies \forall k \in \mathbb{N} \quad B_{\frac{r}{2^k}}(0) \subset \overline{U(B_{\frac{1}{2^k}}(0))}$$

- При $k = 1$

$$\|y\| < \frac{r}{2} \implies y \in B_{\frac{r}{2}}(0) \subset \overline{U(B_{\frac{1}{2}}(0))}$$

$$\exists x_1 : \|x_1\| < \frac{1}{2}, \|y - Ux_1\| < \frac{r}{4}$$

- $k = 2$

$$y - Ux_1 \in B_{\frac{r}{4}}(0) \subset \overline{U(B_{\frac{1}{4}}(0))} \implies \exists x_2 : \|x_2\| < \frac{1}{4}, \|y - Ux_1 - Ux_2\| < \frac{r}{2^3}$$

...

- Построим $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ такую, что

$$\|x_n\| < \frac{1}{2^n}, \|y - Ux_1 - \dots - Ux_n\| < \frac{r}{2^{n+1}}$$

$$\sum_{n=1}^\infty \|x_n\| < 1 \xRightarrow{\text{критерий полноты}} \exists x = \sum_{n=1}^\infty x_n \in X, \|x\| < 1$$

$$S_n := \sum_{k=1}^n x_k$$

$$\left. \begin{aligned} \lim S_n = x &\implies \lim US_n = Ux \\ \lim \|y - US_n\| = 0 &\implies \lim US_n = y \end{aligned} \right\} \implies Ux = y$$

□

Теорема 19 (Банах). X, Y — банаховы, $U \in \mathcal{B}(X, Y)$
Если $U(X) = Y$, то U открыто.

Доказательство. Обозначим $B_r = B_r(0)$.

$$X = \bigcup_{n=1}^\infty (B_n) \implies U(X) = Y = \bigcup_{n=1}^\infty U(B_n)$$

По теореме Бэра о категориях

$$\exists n_0 \in \mathbb{N} : \text{Int } \overline{U(B_{n_0})} \neq \emptyset$$

При этом, $U(B_{n_0}) = n_0 U(B_1)$ (в n_0 раз увеличенное $U(B_1)$).

$$\implies \text{Int } \overline{U(B_1)} \neq \emptyset \implies \exists a \in Y \exists y > 0 : B_r(a) \subset \overline{U(B_1)}$$

Чтобы воспользоваться леммой, нужно сдвинуть точку a в 0.

Возьмём $z \in X : \|z\| < r$.

$$\left. \begin{aligned} a + z &\in \mathcal{B}_r(a) \subset \overline{U(B_1)} \\ a &\in \overline{U(B)} \implies -a \in \overline{U(B_1)} \end{aligned} \right\} \implies z = (a + z) + (-a) \in \overline{U(B)} + \overline{U(B_1)} \subset \overline{U(B_1)}$$

Воспользуемся подобием:

$$\mathcal{B}_{\frac{r}{2}}(0) \subset \overline{U(B)} \xrightarrow[\text{лемма}]{\implies} \mathcal{B}_{\frac{r}{4}}(0) \subset U(B)$$

□

51. Теорема Банаха об обратном операторе. Эквивалентность норм, в которых пространство банахово

Теорема 20 (Банах). X, Y — банаховы, $U \in \mathcal{B}(X, Y)$ — биекция

$$U^{-1} \in \mathcal{B}(Y, X)$$

Доказательство.

$$U(X) = Y \xrightarrow[\text{т. об. откр. отобра.}]{\implies} U \text{ открыто} \xrightarrow[\text{утв.}]{\implies} U^{-1} \text{ непрерывно}$$

□

Теорема 21 (об эквивалентных нормах). $(X, \|\cdot\|_1), (X, \|\cdot\|_2)$ — банаховы, $\exists C > 0 : \|x\|_2 \leq C \|x\|_1$

$$\exists A > 0 : \|x\|_1 \leq A \|x\|_2$$

Доказательство. Обозначим $X = (X, \|\cdot\|_1), Y = (X, \|\cdot\|_2)$.

Определим оператор $I : X \rightarrow Y : Ix = x$. Понятно, что I — биекция и $I \in \mathcal{L}in(X, Y)$.

$$\|Ix\|_2 \leq C \|x\|_1 \implies I \in \mathcal{B}(X, Y)$$

По теореме Банаха об обратном операторе

$$I^{-1} \in \mathcal{B}(Y, X) \implies \|I^{-1}x\|_1 \leq A \|x\|_2, \quad A = \|I^{-1}\|$$

$$\iff \|x\|_1 \leq A \|x\|_2$$

□

52. Замкнутый оператор. Теорема о замкнутом графике. Пример замкнутого, но не непрерывного оператора

Определение 6. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|)$ над \mathbb{K}
 $X \times Y$ — линейное пространство:

$$(x_1, y_1) + (x_2, y_2) := (x_1 + x_2, y_1 + y_2)$$

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

Определим норму на $X \times Y$:

$$\|(x, y)\|_{X \times Y} = \|x\|_X + \|y\|_Y$$

Замечание. Сходимость по такой норме — покоординатная:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n, y_n) = (x, y) \iff \begin{cases} \lim x_n = x \\ \lim y_n = y \end{cases}$$

Если X, Y — банаховы, то $X \times Y$ — банахово.

Определение 7. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), U \in \mathcal{L}in(X, Y)$

Определим *график* U :

$$G_U = \{ (x, Ux) \}_{x \in X} \subset X \times Y$$

Оператор U называется *замкнутым*, если G_U замкнуто в $X \times Y$.

$$\Longleftrightarrow \left(\lim(x_n, Ux_n) = (x, y) \implies y = Ux \right)$$

$$\Longleftrightarrow \left(\lim x_n = x \right. \left. \lim Ux_n = y \right) \implies y = Ux$$

Замечание. Замкнутый оператор — это **не тот**, который переводит замкнутые множества в замкнутые.

Замечание. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), U \in \mathcal{L}in(X, Y)$

1. $\lim x_n = x$;
2. $\lim Ux_n = y$;
3. $y = Ux$.

$$U \text{ замкнут} \Longleftrightarrow (1) + 2) \implies 3)$$

$$U \text{ непрерывен} \Longleftrightarrow (1) \implies 2) + 3)$$

Значит, если U непрерывен, то он замкнут.

Теорема 22 (о замкнутом графике). X, Y — банаховы, $U \in \mathcal{L}in(X, Y)$ — замкнутый

U непрерывен

Доказательство. Определим новую норму пространства X :

$$\|x\|_1 = \|x\|_X + \|Ux\|_Y$$

Проверим, что $(X, \|\cdot\|_1)$ банахово. Пусть $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ фундаментальна в $(X, \|\cdot\|_1)$, т. е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_m - x_n\|_1 = 0$$

$$\Longleftrightarrow \lim(\|x_m - x_n\|_X + \|Ux_m - Ux_n\|_Y) = 0$$

Значит, $\{x_n\}$ фундаментальна в $(X, \|\cdot\|_X)$, и $\{Ux_n\}$ фундаментальна в Y . Оба эти пространства банаховы.

$$\implies \exists x \in X \exists y \in Y : \lim \|x_n - x\|_X = 0$$

$$\implies \begin{cases} \lim x_n = x \text{ в } (X, \|\cdot\|_X) \\ \lim Ux_n = y \text{ в } Y \end{cases} \xRightarrow{U \text{ замкнут}} y = Ux \implies \lim(\|x_n - x\|_X + \|Ux_n - Ux\|_Y) = 0$$

$$\implies \lim \|x_n - x\|_1 = 0 \implies (X, \|\cdot\|_1) \text{ банахово, } \|x\|_X \leq \|x\|_1 \leq \|x\|_X + \|Ux\|_Y = \|x\|_1 \xRightarrow{\text{т. об экв. норм}} \|x\|_X \leq \|x\|_1$$

$$\implies \exists A > 0 : \|x\|_1 \leq A\|x\|_X \implies \|x\|_X + \|Ux\|_Y \leq A\|x\|_X \implies \|Ux\|_Y \leq A\|x\|_X \implies U \in \mathcal{B}(X, Y)$$

□

Пример (U замкнут, но не непрерывен). $X = \{ \exists f' \in \mathcal{C}[0, 1] \}, \|f\|_X = \max_{[0,1]} |f(x)|$

$X \subset \mathcal{C}[0, 1]$ в алгебраическом смысле

$$Y = \mathcal{C}[0, 1], \|g\|_Y = \max_{[0,1]} |g(x)| = \|g\|_\infty$$

$$\begin{aligned}
& \mathcal{D}(f) = f', \quad \mathcal{D} \in \mathcal{L}in(X, Y), \quad \mathcal{D} \text{ замкнут} \\
& \left\{ \begin{aligned} & \{f_n \in X\}_{n=1}^\infty, \quad \lim f_n = f \iff f_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{[0,1]} f \\ & \mathcal{D}(f_n) = f'_n, \quad \mathcal{D}(f_n) \rightarrow g \end{aligned} \right\} \xrightarrow[\text{док. в анализе}]{\iff} g = f' \implies g = \mathcal{D}(f) \iff f'_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{[0,1]} g \\
& x^n \in X: \quad \|x^n\|_X = 1, \quad \mathcal{D}(x^n) = nx^{n-1}, \quad \|\mathcal{D}(x^n)\| = n \\
& \implies \sup_{\|f\| \leq 1} \|\mathcal{D}(f)\| = +\infty \implies \mathcal{D} \notin \mathcal{B}(X, Y)
\end{aligned}$$

53. Сопряжённые пространства к пространствам последовательностей C_0 , l^p , пространству L^p для конечных p

Теорема 23 (сопряжённые к l^p). $1 \leq p < +\infty$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$

$$1. \ y = \{y_n\}_{n=1}^\infty \in l^q, \quad F_y: l^p \rightarrow \mathbb{K}, \quad x = \{x_n\}_{n=1}^\infty \in l^p, \quad F_y(x) := \sum_{n=1}^\infty x_n y_n$$

$$F_y \in (l^p)^*, \quad \|F_y\|_{(l^p)^*} = \|y\|_q$$

$$2. \ F \in (l^p)^*$$

$$\exists! y: \quad F = F_y$$

Доказательство.

$$1. \ y \in l^q, \quad x \in l^p$$

$$|F_y(x)| = \left| \sum_{n=1}^\infty x_n y_n \right| \underset{\text{нер-во Гёльдера}}{\leq} \|x\|_p \cdot \|y\|_q, \quad F_y \in (l^p, \mathbb{K})$$

$$\implies F_y \in \mathcal{B}(l^p, \mathbb{K}) = (l^p)^*, \quad \|F_y\|_{(l^p)^*} \leq \|y\|_q$$

$$2. \ F \in (l^p)^*, \quad e_n = (0, \dots, 0, \underset{n}{1}, 0, \dots, 0) \text{ — базис } l^p$$

Определим $y_n = F(e_n)$.

$$x = \{x_n\}_{n=1}^\infty \in l^p \implies x = \sum_{n=1}^\infty x_n e_n \text{ — сходитсЯ в } l^p$$

$$S_n := \sum_{k=1}^n x_k e_k \implies F(S_n) = \sum_{k=1}^n x_k y_k \xrightarrow[F \text{ непрерывен}]{\iff}$$

$$\implies \lim S_n = x \implies \lim F(S_n) = F(x) \implies F(x) = \sum_{k=1}^\infty x_k y_k \implies F = F_y$$

Проверим, что $y \in l^q$.

• $p > 1 \implies q < +\infty$ Рассмотрим пробные функции

$$x_k = \begin{cases} \frac{\overline{y_k}}{|y_k|} \cdot |y_k|^{q-1}, & y_k \neq 0, \\ 0, & y_k = 0 \end{cases}$$

Рассмотрим последовательности

$$x^{(n)} = \sum_{k=1}^n x_k e_k = (x_1, \dots, x_n, 0, \dots)$$

$$F(x^{(n)}) = \sum_{k=1}^n x_k y_k = \sum |y_k|^q$$

$$\|x^{(n)}\|_p^p = \sum_{k=1}^n |x_k|^p = \sum |y_k|^{p(q-1)} \xrightarrow{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1 \Rightarrow p+q=pq \Rightarrow pq-p=q} \sum_{k=1}^n |y_k|^q$$

$$\|F\| = \sup_{x \neq 0} \frac{|F(x)|}{\|x\|_p} \geq \frac{F(x^{(n)})}{\|x^{(n)}\|} = \frac{\sum_{k=1}^n |y_k|^q}{\left(\sum_{k=1}^n |y_k|^q\right)^{\frac{1}{p}}} = \left(\sum_{k=1}^n |y_k|^q\right)^{1-\frac{1}{p}} = \left(\sum_{k=1}^n |y_k|^q\right)^{\frac{1}{q}} \quad \forall n \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y \in l^q, \quad \|F\| \geq \|y\|_q, \quad F = F_y$$

Докажем единственность:

Пусть $F = F_y$, $F = F_z$.

$$F(e_n) = y_n, \quad F(e_n) = z_n \Rightarrow y_n = z_n$$

$$\bullet \quad p = 1 \Rightarrow q = \infty$$

$$F(e_n) = y_n, \quad \|F\|_{(l^1)^*} \geq |y_n| \Rightarrow y \in l^\infty$$

$$\|F\| \geq \sup_{n \in \mathbb{N}} |y_n| = \|y\|_\infty$$

□

Замечание. $T : (l^q) \rightarrow (l^p)^* : T(y) = F_y$

Мы доказали, что, при $1 \leq p < +\infty$, T — линейный изометрический изоморфизм. Говорят, что $(l^p)^* = l^q$.

Теорема 24 (сопряжённое к C_0). $C_0 = \left\{ x = \{x_n \in \mathbb{K}\}_{n=1}^\infty \mid \exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0 \right\}$

$$1. \quad y \in l^1, \quad x \in C_0, \quad F_y(x) := \sum_{n=1}^\infty x_n y_n$$

$$F_y \in C_0^*, \quad \|F_y\| = \|y\|_1$$

$$2. \quad F \in C_0^*$$

$$\exists! y \in l^1 : \quad F = F_y$$

Доказательство.

$$1. \quad y \in l^1, \quad x \in C_0$$

$$|F_y(x)| = \left| \sum_{n=1}^\infty x_n y_n \right| \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n| \cdot \sum_{n=1}^\infty |y_n| = \|x\|_\infty \cdot \|y\|_1$$

$$\Rightarrow F_y \in C_0^*, \quad \|F_y\| \leq \|y\|_1$$

$$2. \quad \{e_n\}_{n=1}^\infty \text{ — базис в } C_0. \text{ Рассмотрим } F \in C_0^*.$$

$$y_n := F(e_n)$$

$$x = \{x_n\}_{n=1}^\infty \in C_0 \Rightarrow x = \sum_{k=1}^\infty x_k e_k$$

$$S_n := \sum_{k=1}^n x_k e_k$$

$$F(S_n) = \sum_{k=1}^n x_k y_k \xrightarrow{F \text{ непрерывен}} \lim F(S_n) = F(x) \Rightarrow F(x) = \sum_{k=1}^\infty x_k y_k \text{ сходится} \Rightarrow F = F_y$$

Проверим, что $y \in l^1$.

$$\begin{aligned} x^{(n)} &:= \sum_{k=1}^n \frac{\overline{y_k}}{|y_k|} e_k \implies x^{(n)} \in C_0, \quad \|x^{(n)}\|_\infty = 1 \\ \implies F(x^{(n)}) &= \sum_{k=1}^n y_k \frac{\overline{y_k}}{|y_k|} = \sum_{k=1}^n |y_k| \\ \|F\| &\geq |F(x^{(n)})| = \sum_{k=1}^n |y_k| \quad \forall n \in \mathbb{N} \implies y \in l^1 \end{aligned}$$

□

Теорема 25 (сопряжённое к L^p).

1. $1 \leq p \leq +\infty$, $g \in L^q(X, \mu)$, $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, g — фиксирована, $h \in L^p$

$$F_g(h) := \int_X h(x)g(x) \, d\mu$$

$$\implies F_g \in (L^p)^*, \quad \|F_g\| = \|g\|_{L^p}$$

2. $1 \leq p < +\infty$, $F \in (L^p)^*$

$$\exists! g \in L^p : \quad F = F_g$$

Доказательство. Докажем только первое утверждение.

Очевидно, что $F_g \in \mathcal{L}in(L^p, \mathbb{C})$, так как интеграл линеен.

Для $f \in L^q$, $h \in L^p$,

$$|F_g(h)| = \left| \int_X hg \, d\mu \right| \underset{\text{нер-во Гёльдера}}{\leq} \|h\|_p \|g\|_q \quad \forall h \in L^p \implies \|F_g\| \leq \|g\|_q$$

- $1 < p \leq +\infty$

Рассмотрим пробные функции

$$U(x) = \begin{cases} \frac{\overline{g(x)}}{|g(x)|} |g(x)|^{q-1}, & g(x) \neq 0, \\ 0, & g(x) = 0 \end{cases}$$

Проверим, что $U \in L^p$:

$$|U(x)|^p = |g(x)|^{p(q-1)} \underset{(q-1)p=q(1-\frac{1}{q})p=q\frac{1}{p}p=q}{=} |g|^q \implies \left(\int_X |U|^p \, d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\int_X |g|^q \, d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \implies U \in L^p$$

$$F_g(U) = \int_X g(x) \frac{\overline{g(x)}}{|g(x)|} |g(x)|^{q-1} \, d\mu = \int_X |g|^q \, d\mu = \|g\|^q$$

$$\|F_g\| = \sup_{h \neq 0} \frac{\|F_g(h)\|}{\|h\|} \geq \frac{|F_g(U)|}{\|U\|} = \frac{\|g\|^q}{\|g\|^{\frac{q}{p}}} = \|g\|$$

- $p = 1$, $q = \infty$

$$- \|g\|_\infty = 0 \implies g = 0 \text{ п. в. } \implies F_g = \mathbb{O}, \quad \|F_g\| = 0;$$

$$- \|g\|_\infty > 0$$

Возьмём $c > 0$: $\|g\| > c$.

$$A := \{x \in X \mid |g(x)| \geq c\} \implies +\infty > \mu(A) > 0$$

Докажем, что такое A вообще существует. Возьмём $e \subset A$.

$$\begin{aligned}
X &= \bigcup_{j=1}^{\infty} X_j, \quad \mu(X_j) < +\infty \implies 0 < \mu e < +\infty \\
\implies A &= \bigcup_{j=1}^{\infty} (A \cap X_j), \quad e_j = A \cap X_j \implies \mu e_j < +\infty \\
\implies e &= e_j, \quad 0 < \mu e < +\infty, \quad e \subset A \\
U(x) &= \frac{\overline{g(x)}}{|g(x)|} \chi_e(x) \implies \|U\|_{\infty} = 1 \\
F_g(U) &= \int_X g(x) \frac{\overline{g(x)}}{|g(x)|} \chi_e \, d\mu = \int_e |g(x)| \, d\mu \geq c\mu(e) \\
U &\in L^1, \quad \|U\|_1 = \int_X |U(x)| \, d\mu = \int_e 1 \, d\mu = \mu(e) \\
\|F_g\| &\geq \frac{|F_g(U)|}{\|U\|_1} \geq \frac{c\mu(e)}{\mu(e)} = c \quad \forall 0 < c < \|g\|_{\infty} \\
&\implies \|F_g\| \geq \|g\|_{\infty}
\end{aligned}$$

□

54. Второе сопряжённое пространство. Каноническое вложение. Рефлексивность. Примеры

Определение 8. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), \quad x \in X, \quad f \in X^*$

$$\langle f, x \rangle := f(x)$$

$$T \in \mathcal{B}(X, Y), \quad T^* : Y^* \rightarrow X^*$$

$$\langle T^* f, x \rangle := \langle f, Tx \rangle$$

$$\pi : X \rightarrow X^{**}, \quad f \in X^*, \quad x \in X$$

$$\langle \pi(x), f \rangle := f(x)$$

Можно отождествить $\pi(X)$ с X :

$$\langle x, f \rangle = f(x)$$

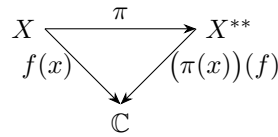


Рис. 1: Иллюстрация к опр. 8

Пример. $L^p(\mu), \quad L^q(\mu), \quad 1 < p < +\infty, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \quad f \in L^p, \quad g \in L^q$

$$\langle f, g \rangle = \int_X f(x)g(x) \, d\mu, \quad \langle g, f \rangle = \int_X f(x)g(x) \, d\mu$$

Свойство (канонического вложения). $\pi : X \rightarrow X^{**}$

$$\pi \in \mathcal{B}(X, X^{**}), \quad \pi \text{ — изометрическое вложение}$$

$$(\text{т. е. } \|\pi(x)\| = \|x\|)$$

Доказательство. Зафиксируем $x \in X$.

- Проверим, что $\pi(x) \in \mathcal{L}in(X^*, \mathbb{C})$

Для $\alpha \in \mathbb{C}$ и $f \in X^*$

$$(\pi(x))(f) \stackrel{\text{def}}{=} (\alpha f)(x) = \alpha f(x) = \alpha (\pi(x))(f)$$

Для $f, g \in X^*$ имеем по определению

$$(\pi(x))(f+g) = (f+g)(x) = f(x) + g(x) = (\pi(x))(f) + (\pi(x))(g)$$

Значит, $\pi(x) \in \mathcal{L}in(X^*, \mathbb{C})$.

- Проверим, что $\|\pi(x)\| = \|x\|$

$$|(\pi(x))(f)| = |f(x)| \leq \|f\| \cdot \|x\| \quad \forall f \in X^* \implies \pi(x) \in (X^*)^*, \quad \|\pi(x)\| \leq \|x\|$$

Неравенство в другую сторону имеем по следствию о достаточном числе линейных функционалов:

$$\exists g \in X^* : \quad \|g\| = 1, \quad g(x) = \|x\|$$

(для фиксированного $x \in X$)

$$\|\pi(x)\| = \sup_{f \in X^* : \|f\| \leq 1} |(\pi(x))(f)| \geq \text{можно взять такое } g \quad |(\pi(x))(g)| = |g(x)| = \|x\|$$

- Проверим, что $\pi \in \mathcal{L}in(X, X^{**})$

– Возьмём $\alpha \in \mathbb{C}$, $x \in X$, $f \in X^*$.

$$(\pi(\alpha x))(f) = f(\alpha x) = \alpha f(x) = \alpha \cdot (\pi(x))(f) \quad \forall f \in X^* \implies \pi(\alpha x) = \alpha \pi(x)$$

– Возьмём $x, y \in X$, $f \in X^*$.

$$\begin{aligned} (\pi(x+y))(f) &= f(x+y) = f(x) + f(y) = (\pi(x))(f) + (\pi(y))(f) \quad \forall f \in X^* \implies \\ &\implies \pi(x+y) = \pi(x) + \pi(y) \xrightarrow{\|\pi(x)\|=\|x\|} \pi \in \mathcal{B}(X, X^{**}), \quad \|\pi\| = 1 \end{aligned}$$

□

Следствие (как строить пополнение нормированного пространства). $(X, \|\cdot\|)$, $Y = \overline{\pi(X)}$

Тогда Y — пополнение X .

Доказательство. X^* — банахово $\implies X^{**}$ банахово $\implies \pi : X \rightarrow X^{**}$ — изометрическое вложение $\implies \overline{\pi(X)}$ — пополнение X . □

Определение 9. Пространство X называется *рефлексивным*, если $\pi(X) = X^{**}$, т. е. π сюръективно, т. е.

$$\forall G \in (X^*)^* \quad \exists x \in X : \quad G = G_x \quad (\text{или } G = \pi(x))$$

Следствие. X рефлексивно.

Тогда X — банахово.

Следствие. X рефлексивно, $f \in X^*$

$$\|f\| = \max_{\|x\| \leq 1} |f(x)|$$

(в случае рефлексивного пространства в норме можно супремум заменить на максимум)

Доказательство. Вспомним, что для любого нормированного X

$$\|f\| = \sup_{\|x\| \leq 1} |f(x)|, \quad \|x\| = \max_{\|g\|_{X^*} \leq 1} |g(x)|$$

$$f \in X^* \implies \|f\| = \max_{\varphi \in X^{**}: \|\varphi\|=1} |\varphi(f)| \stackrel{\text{рефлексивность}}{=} \max_{\|x\|=1} |(\pi(x))(f)| = \max_{\|x\|=1} |f(x)|$$

□

Примеры.

1. $1 < p < +\infty$

$L^p(X, \mathcal{U}, \mu)$ — рефлексивные.

$$(L^p)^* \sim L^q, \quad 1 < q < +\infty$$

$$(L^q)^* \sim L^p$$

2. L^1 и L^∞ не рефлексивны.

3. C_0 и l^1 не рефлексивны.

$$(C_0)^* \sim l^1$$

$$(l^1)^* \sim l^\infty$$

4. H — гильбертово

H рефлексивно.

H^* сопряжённо линейно изоморфно H . Тогда H^{**} сопряжённо линейно изоморфно $H^* \implies H^{**} \sim H$.

5. $\mathcal{C}(\mathbb{K})$ не рефлексивно (без доказательства).

Часть III

Сопряжённые операторы

55. Существование и простейшие свойства сопряжённого оператора в нормированном пространстве

Определение 10. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), T \in \mathcal{B}(X, Y)$.

Определим *сопряжённый оператор* к T :

$$T^* : Y^* \rightarrow X^* : (T^*f)(x) = f(Tx)$$

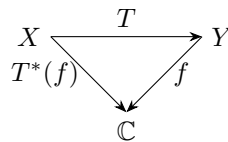


Рис. 2: Иллюстрация к опр. 10

Утверждение 6. T^* линеен

Доказательство. f линеен, T линеен $\implies T^*$ линеен.

□

Свойства. $(X, \|\cdot\|), (Y, \|\cdot\|), T \in \mathcal{B}(X, Y)$

1. $T^* \in \mathcal{B}(Y^*, X^*), \|T^*\| = \|T\|;$

2. $\alpha \in \mathbb{C}$

$$(\alpha T)^* = \alpha T^*$$

3. $S, T \in \mathcal{B}(X, Y)$

$$(S + T)^* = S^* + T^*$$

4. $X \xrightarrow{T} Y \xrightarrow{S} Z$

$$(ST)^* = T^* S^*$$

Доказательство.

1. • Линейность

Возьмём $f, g \in Y^*$, $\alpha \in \mathbb{C}$, $x \in X$.

$$\begin{aligned} (T^*(\alpha f + g))(x) &= (\alpha f + g)(Tx) = \alpha f(Tx) + g(Tx) = \alpha(T^*f)(x) + (T^*g)(x) \quad \forall x \in X \implies \\ &\implies \alpha T^*f + T^*g = T^*(\alpha f + g) \end{aligned}$$

• Равенство норм

$$\|T^*\| = \sup_{f \in Y^*: \|f\| < 1} \|T^*f\| = \sup_{\|f\| < 1} \left(\sup_{\|x\| < 1} |(T^*f)(x)| \right) \stackrel{\text{def}}{=} T^* \sup_{\|x\| < 1} \left(\sup_{\|f\| < 1} |f(Tx)| \right)$$

Но, по следствию о достаточном числе линейных функционалов, $\sup_{\|f\| < 1} |f(Tx)| = \|Tx\|$.

$$\|T^*\| = \sup_{\|x\| < 1} \|Tx\| = \|T\|$$

2. $\alpha \in \mathbb{C}$, $f \in Y^*$, $x \in X$

$$((\alpha T)^*f)(x) = f(\alpha Tx) = \alpha f(Tx) = \alpha(T^*(f))(x) \quad \forall x \in X \quad \forall f \in Y^* \implies (\alpha T)^* = \alpha T^*$$

3. $S, T \in \mathcal{B}(X, Y)$, $f \in Y^*$, $x \in X$

$$\begin{aligned} ((S + T)^*f)(x) &= f((S + T)x) = f(Sx) + f(Tx) = (S^*f)(x) + (T^*f)(x) \quad \forall x \in X \quad \forall f \in Y^* \implies \\ &\implies (S + T)^* = S^* + T^* \end{aligned}$$

4. $X \xrightarrow{T} Y \xrightarrow{S} Z$

$$ST : X \rightarrow Z, \quad (ST)^* : Z^* \rightarrow X^*$$

Возьмём $f \in Z^*$, $x \in X$.

$$\begin{aligned} ((ST)^*f)(x) &= f((ST)x) = f(S(Tx)) = (S^*f)(Tx) = (T^*(S^*f))(x) \quad \forall x \in X \quad \forall z \in Z^* \implies \\ &\implies (ST)^* = T^* S^* \end{aligned}$$

□

Про существование найти не могу...

56. Теорема об интегральном операторе с ядром из L^p и сопряжённом к нему

Теорема 26. $(\mathbb{R}^n, \lambda_n)$, $(\mathbb{R}^m, \lambda_m)$, $K(x, y) \in L^p(\mathbb{R}^{n+m}, \lambda_{n+m})$, $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$

$$M := \left(\int_{\mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^m} |K(x, y)|^p dx dy \right)^{\frac{1}{p}} < +\infty$$

$$(\mathcal{K}f)(x) = \int_{\mathbb{R}^m} K(x, y) f(y) \, dy$$

Тогда

$$1. \mathcal{K} \in \mathcal{B}(L^q(\mathbb{R}^m), L^p(\mathbb{R}^n)), \quad \|\mathcal{K}\| \leq M;$$

$$2. \mathcal{K}^* \in \mathcal{B}(L^q(\mathbb{R}^m), L^p(\mathbb{R}^n))$$

$$\begin{aligned} (\mathcal{K}^*g)(y) &= \int_{\mathbb{R}^n} K^*(y, x) g(x) \, dx \\ \implies K^*(y, x) &= K(x, y) \end{aligned}$$

Доказательство.

1. Воспользуемся теоремой Фубини:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \left(\int_{\mathbb{R}^m} |K(x, y)|^p \, dy \right) dx < +\infty \implies \text{для п. в. } x \quad \int_{\mathbb{R}^m} |K(x, y)|^p \, dy < +\infty$$

Возьмём $f \in L^q(\mathbb{R}^m)$ и x такой, что внутренний интеграл конечен.

$$|(\mathcal{K}f)(x)| = \left| \int_{\mathbb{R}^m} K(x, y) f(y) \, dy \right| \stackrel{\text{н-во Гельдера}}{\leq} \left(\int_{\mathbb{R}^m} |K(x, y)|^p \, dy \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \|f\|_q$$

Возведём в степень p и проинтегрируем по \mathbb{R}^n :

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} |(\mathcal{K}f)(x)|^p \, dx &\leq \|f\|_q^p \int_{\mathbb{R}^n} \left(\int_{\mathbb{R}^m} |K(x, y)|^p \, dy \right) dx = M^p \implies \\ \implies \|\mathcal{K}f\|_p &\leq M \|f\|_q \quad \forall f \in L^q \implies \|\mathcal{K}\| \leq M, \quad \mathcal{K} \in \mathcal{B}(\dots) \end{aligned}$$

$$2. \mathcal{K}^* \in \mathcal{B}(L^q(\mathbb{R}^n), L^p(\mathbb{R}^m))$$

$$g \in L^q(\mathbb{R}^n), \quad f \in L^q(\mathbb{R}^m)$$

$$\langle \mathcal{K}^*g, f \rangle = \langle g, \mathcal{K}f \rangle = \int_{\mathbb{R}^n} g(x) \left(\int_{\mathbb{R}^m} K(x, y) f(y) \, dy \right) dx \stackrel{\text{т. Фубини}}{=} \int_{\mathbb{R}^m} \left(\int_{\mathbb{R}^n} K(x, y) g(x) \, dx \right) f(y) \, dy \quad (4)$$

$$\langle \mathcal{K}^*g, y \rangle \stackrel{\text{def}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} K^*(y, x) g(x) \, dx$$

$$\langle \mathcal{K}^*g, f \rangle = \int_{\mathbb{R}^m} \left(\int_{\mathbb{R}^n} K^*(y, x) g(x) \, dx \right) f(y) \, dy \stackrel{(4)}{=} \int_{\mathbb{R}^m} K^*(y, x) g(x) \, dx f(y) \, dy \implies K^*(y, x) = K(x, y)$$

□

57. Существование и простейшие свойства эрмитово-сопряжённого оператора в гильбертовом пространстве

H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$, $y \in H$ — фиксирован, $G_y : H \rightarrow \mathbb{C}$, $x \in H$, $G_y(x) := (Tx, y)$

$$\implies G_y \in \mathcal{L}in(H, \mathbb{C})$$

Возьмём $x \in H$.

$$|G_y(x)| = |(Tx, y)| \leq \|Tx\| \cdot \|y\| \leq \|T\| \cdot \|y\| \cdot \|x\| \implies G_y \in H^*, \quad \|G_y\| \leq \|T\| \cdot \|y\|$$

Воспользуемся теоремой Рисса:

$$\exists! z \in H : \quad G_y(x) = (x, z), \quad \|z\| = \|G_y\|_{H^*}$$

Определение 11. $T^*y = z$ будем называть эрмитово-сопряжённым к T .

Свойства. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$

1. $T^{**} = T$;
2. $T^* \in \mathcal{B}(H)$, $\|T^*\| = \|T\|$;
3. $\alpha \in \mathbb{C}$, $(\alpha T)^* = \bar{\alpha}T^*$;
4. $T, S \in \mathcal{B}(H) \implies (T + S)^* = T^* + S^*$;
5. $(TS)^* = S^*T^*$;
6. если T — биекция, то $\exists T^{-1} \in \mathcal{B}(H)$, $\exists (T^*)^{-1}$, при этом $(T^*)^{-1} = (T^{-1})^*$.

Доказательство.

1. $(Tx, y) = (x, T^*y)$

$$\begin{aligned} (x, Ty) &= \overline{(Ty, x)} = \overline{(y, T^*x)} = (T^*x, y) = (x, T^{**}y) \quad \forall x \\ &\implies Ty = T^{**}y \quad \forall y \in H \end{aligned}$$

2. $T^* \in \mathcal{B}(H)$, $\|T^*\| \leq \|T\| \implies \|T^{**}\| \leq \|T^*\| \xrightarrow{T^{**}=T} \|T^*\| = \|T\|$

3. $\alpha \in \mathbb{C}$

$$(Tx, y) = (x, T^*y) \implies ((\alpha T)x, y) = (x, \bar{\alpha}T^*y) \implies (\alpha T^*) = \bar{\alpha}T^*$$

4. Очевидно.

5. Очевидно.

6. $\exists T^{-1}$

$$\left. \begin{aligned} T \cdot T^{-1} &= I \xRightarrow{5)} (T^{-1})^*T^* = (I^*) = I \\ T^{-1} \cdot T &= I \xRightarrow{5)} (T^*)(T^{-1})^* = I \end{aligned} \right\} \implies \exists (T^*)^{-1} = (T^{-1})^*$$

□

Замечание. X, Y — банаховы, $T \in \mathcal{B}(X, Y)$, $\exists T^{-1} \in \mathcal{B}(Y, X)$

$$\exists (T^*)^{-1} = (T^{-1})^*$$

Без доказательства.

□

58. Теорема об интегральном операторе с ядром из L^2 и эрмитово-сопряжённым к нему

Теорема 27. $L^2(\mathbb{R}^n, \lambda_n)$, $K(x, y) \in L^2(\mathbb{R}^{2n})$,

$$M = \left(\int_{\mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} |K(x, y)|^2 dx dy \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$(\mathcal{K}f)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} K(x, y)f(y) dy$$

Тогда

1. $\mathcal{K} \in \mathcal{B}(L^2(\mathbb{R}^n))$, $\|\mathcal{K}\| \leq M$

2. $\mathcal{K}^* \in \mathcal{B}(L^2(\mathbb{R}^n))$

$$(\mathcal{K}^*g)(y) = \int_{\mathbb{R}^n} K^*(y, x)g(x) dx$$

$$\implies K^*(y, x) = \overline{K(x, y)}$$

Доказательство.

1. Так же, как в предыдущей теореме.

2. Возьмём $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$.

$$(f, g) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x)\overline{g(x)} dx$$

$$(\mathcal{K}^*g, f) = (g, \mathcal{K}f) = \int_{\mathbb{R}^n} g(x) \overline{\int_{\mathbb{R}^n} K(x, y)f(y) dy} dx \stackrel{\text{т. Фубини}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} \left(\int_{\mathbb{R}^n} \overline{K(x, y)}g(x) \right) \overline{f(y)} dy =$$

$$= \left(\int_{\mathbb{R}^n} \overline{K(x, y)}g(x) dx, f \right)$$

$$\implies (\mathcal{K}^*g)(y) = \int_{\mathbb{R}^n} \overline{K(x, y)}g(x) dx \implies K^*(y, x) = \overline{K(x, y)}$$

□

59. Теорема об образе и ядре оператора и его сопряжённого. Теорема об ортогональном дополнении инвариантного подпространства. Самосопряжённый оператор, примеры

Общее наблюдение. L — подпространство H в алгебраическом смысле,

$$M = L^\perp = \{ x \in H \mid x \perp y \quad \forall y \in L \}$$

$$(\overline{L})^\perp = M$$

$$\implies H = M \oplus \overline{L}$$

Теорема 28. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$

$$H = (\text{Ker } T) \oplus \overline{T^*(H)} = (\text{Ker } T^*) \oplus \overline{T(H)}$$

Доказательство. В качестве L возьмём $L = T^*(H)$. Возьмём $x \in L^\perp$.

$$(x, T^*y) = 0 \iff (Tx, y) = 0 \iff Ty = 0 \iff y \in \text{Ker } T$$

$$\implies (T^*(H))^\perp = \text{Ker } T \implies H = \text{Ker } T \oplus \overline{T^*(H)}$$

Применим эту формулу к T^* (учитывая, что $T^{**} = T$):

$$H = \text{Ker } T^* \oplus \overline{T(H)}$$

□

Определение 12. $(X, \|\cdot\|)$, $T \in \mathcal{B}(X)$, $Y \subset X$ — подпространство в алгебраическом смысле

Будем говорить, что Y — инвариантное подпространство для T , если $T(Y) \subset Y$ (т. е. $T|_Y \in \mathcal{B}(Y)$).

Теорема 29. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$, Y — инвариантное подпространство для T

Y^\perp — инвариантное подпространство для T^*

Доказательство. $z \in Y^\perp, \quad y \in Y$

$$(y, T^*z) = (Ty, z) \underset{\substack{Ty \in Y \\ z \in Y^\perp}}{=} 0 \implies T^*z \in Y^\perp \implies T^*(Y^\perp) \subset Y^\perp$$

□

Определение 13. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$

T называется *самосопряжённым*, если $T = T^*$, то есть $(Tx, y) = (x, Ty) \quad \forall x \in H$.

Следствие. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$, T — самосопряжённый

Если $Y \subset H$ инвариантно для T , то Y^\perp тоже инвариантно.

Пример. $M = \overline{M} \subset H$, M — подпространство

$$P \text{ — ортопроектор на } M \implies P = P^*$$

60. Определение спектра и резольвенты оператора. Теорема о свойствах резольвенты

Определение 14. X — банахово, $T \in \mathcal{B}(X)$, I — тождественный оператор, $\lambda \in \mathbb{C}$

Будем говорить, что λ — *регулярная точка*, если $V(\lambda) := \lambda I - T$ — биекция.

По теореме Банаха об обратном операторе,

$$V^{-1}(\lambda) \in \mathcal{B}(X)$$

$$R(\lambda, T) = R(\lambda) = V^{-1}(\lambda)$$

R называется *резольвентой*.

Определение 15. Множество всех регулярных точек называется *резольвентным множеством*:

$$\rho(T) = \{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \lambda \text{ — регулярная} \}$$

Определение 16. Множество всех остальных точек назовём *спектром* T :

$$\sigma(T) = \mathbb{C} \setminus \rho(T)$$

Определение 17 (части спектра).

1. $\sigma_p(T)$ — *точечный спектр*

$$\sigma_p(T) = \{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \lambda T - I \text{ не инъекция} \}$$

Для линейного оператора это означает, что $X_\lambda = \text{Ker}(\lambda I - T) \neq \{0\}$.

$$u \neq 0 \in X \implies Tu = \lambda u$$

u — собственный вектор T , соответствующий с. ч. λ . X_λ — собственное подпространство.

2. $\sigma_c(T)$ — *непрерывный спектр*

$$\sigma_c(T) = \left\{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \text{Ker}(\lambda I - T) = \{0\}, \quad \overline{V(\lambda)(X)} = X \right\}$$

(т. е. образ $V(\lambda)$ всюду плотен в X).

3. $\sigma_r(T)$ — остаточный спектр

$$\sigma_r(T) = \left\{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \text{Ker}(\lambda I - T) = \{0\}, \quad \overline{V(\lambda)(X)} \subsetneq X \right\} = \sigma \setminus (\sigma_p \cup \sigma_c)$$

Замечание. В конечномерном случае $\sigma = \sigma_p$.

Свойства. X — банахово, $T \in \mathcal{B}(H)$

1. $\lambda, \mu \in \rho(T)$

$$\implies R(\lambda)R(\mu) = R(\mu)R(\lambda)$$

2. Тождество Гильберта: $\lambda, \mu \in \rho(T)$

$$\implies R(\lambda) - R(\mu) = (\mu - \lambda)R(\lambda)R(\mu)$$

3. $\rho(T)$ открыто в \mathbb{C}

Кроме того, если $\mu \in \rho(T)$, то

$$|\lambda - \mu| < \frac{1}{\|R(\mu)\|} \implies \lambda \in \rho(T)$$

4. $\lambda \in \mathbb{C}, \quad |\lambda| > \|T\|$

$$\implies \lambda \in \rho(T)$$

5. $R(\lambda)$ — непрерывная функция, т. е. если $\mu \in \rho(T)$, то

$$\lim_{\lambda \rightarrow \mu} R(\lambda) = R(\mu), \quad \lim_{\lambda \rightarrow \infty} R(\lambda) = 0$$

6. $F \in (\mathcal{B}(X))^*, \quad \lambda \in \rho(T), \quad g(\lambda) := F(R(\lambda))$

$$\implies g(\lambda) \text{ аналитична в } \rho(T), \quad \lim_{\lambda \rightarrow \infty} g(\lambda) = 0$$

Доказательство.

1. $\lambda, \mu \in \rho(T)$

$$V(\lambda)V(\mu) = (\lambda I - T)(\mu I - T) = V(\mu)V(\lambda)$$

$$\exists (V(\lambda))^{-1}, (V(\mu))^{-1}, \quad R(\lambda) = (V(\lambda))^{-1}, \quad R(\mu) = (V(\mu))^{-1}$$

$$\implies (V(\mu))^{-1}(V(\lambda))^{-1} = (V(\lambda))^{-1}(V(\mu))^{-1}$$

2. $\lambda, \mu \in \rho(T)$

$$V(\lambda) - V(\mu) = (\lambda I - T) - (\mu I - T) = (\lambda - \mu)I$$

Если $A, B \in \mathcal{B}(X)$, $\exists A^{-1}, B^{-1}$, то

$$A^{-1} - B^{-1} = A^{-1}(B - A)B^{-1}$$

Возьмём $A = V(\lambda)$, $B = V(\mu)$.

$$R(\lambda) - R(\mu) = R(\lambda)((\mu - \lambda)I)R(\mu) = (\mu - \lambda)R(\lambda)R(\mu)$$

3. Известно, что $\text{In}(X)$ (множество обратимых операторов) открыто:

$$\exists A^{-1} \quad \|A - B\| < \frac{1}{\|A^{-1}\|} \implies \exists B^{-1}$$

$$\mu \in \rho(T), \quad A = V(\mu) \implies \exists R(\mu) = (V(\mu))^{-1}$$

$$V(\lambda) - V(\mu) = (\lambda - \mu)I \implies \|V(\lambda) - V(\mu)\| = |\lambda - \mu|$$

$$|\lambda - \mu| < \frac{1}{\|R(\mu)\|} \implies \|V(\lambda) - V(\mu)\| < \frac{1}{\|R(\mu)\|} \implies \exists (V(\lambda))^{-1} \implies \lambda \in \rho(T)$$

4. $\lambda \in \mathbb{C}, \quad |\lambda| > \|T\|$

Рассмотрим оператор

$$\left\| \frac{1}{\lambda} T \right\| < 1 \xrightarrow{\text{т. обр. опер., близкого к тожд.}} \exists \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right)^{-1} \implies$$

$$\implies V(\lambda) = \lambda I - T = \lambda \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right) \implies \exists R(\lambda) = (V(\lambda))^{-1} = \frac{1}{\lambda} \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right)^{-1}$$

5. $\mu \in \rho(T)$

$$\lim_{\lambda \rightarrow \mu} (V(\mu) - V(\lambda)) = \lim_{\lambda \rightarrow \mu} (\mu - \lambda)I = 0$$

По теореме об открытости $\text{In}(A)$,

$$\varphi : A \rightarrow A^{-1}, \quad A \in \text{In}(X) \implies \varphi \text{ непрерывно}$$

$$\left. \begin{array}{l} \varphi(V(\lambda)) = V(\lambda) \\ \lim_{\lambda \rightarrow \mu} V(\lambda) = V(\mu) \end{array} \right\} \implies \lim_{\lambda \rightarrow \mu} R(\lambda) = R(\mu)$$

Пусть $|\lambda| > \|T\|$.

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right) = I$$

$$R(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right)^{-1}$$

По непрерывности,

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right)^{-1} = I \implies \lim_{\lambda \rightarrow \infty} R(\lambda) = 0$$

6. $\mu \in \rho(T), \quad \lambda$ из некоторой окрестности μ

$$\frac{R(\lambda) - R(\mu)}{\lambda - \mu} \xrightarrow{\text{т-во Гильберта}} \frac{(\mu - \lambda)R(\lambda)R(\mu)}{\lambda - \mu} = -R(\lambda)R(\mu) \implies \exists \lim_{\lambda \rightarrow \mu} \frac{R(\lambda) - R(\mu)}{\lambda - \mu} = -(R(\mu))^2$$

Возьмём $F \in (\mathcal{B}(X))^*$, $F : \mathcal{B}(X) \rightarrow \mathbb{C}$. Рассмотрим функцию $g(\lambda) = F(R(\lambda))$ при $\lambda \in \rho(T)$.

$$\lim_{\lambda \rightarrow \mu} \frac{g(\lambda) - g(\mu)}{\lambda - \mu} = \lim_{\lambda \rightarrow \mu} \frac{F(R(\lambda)) - F(R(\mu))}{\lambda - \mu} \xrightarrow{\text{лин. } F} \lim_{\lambda \rightarrow \mu} F \left(\frac{R(\lambda) - R(\mu)}{\lambda - \mu} \right) \xrightarrow{\text{непр. } F} -F((R(\mu))^2)$$

То есть, $\exists g'(\mu) \quad \forall \mu \in \rho(T)$.

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} R(\mu) = 0 \xrightarrow{\text{непр. } F} \lim_{\mu \rightarrow \infty} F((R(\mu))^2) = 0$$

□

61. Теорема о компактности и непустоте спектра. Формула для спектрального радиуса. Следствие о спектре сопряжённого оператора

Следствие. X — банахово, $T \in \mathcal{B}(X)$

$$\sigma(T) \text{ — компакт, } \sigma(T) \neq \emptyset$$

Доказательство.

1. Компактность

$$\rho(T) \text{ открыто} \implies \sigma(T) \text{ замкнуто}$$

$$|\lambda| > \|T\| \implies \lambda \in \rho(T)$$

Значит,

$$\lambda \in \sigma(T) \implies |\lambda| \leq \|T\|$$

То есть,

$$\sigma(T) \subset \{ \lambda \in \mathbb{C} \mid |\lambda| \leq \|T\| \} \implies \sigma(T) \text{ ограничено} \implies \sigma(T) \text{ — компакт}$$

2. Непустота

Пусть $\sigma(T)$ пусто. Тогда $\rho(T) = \mathbb{C}$, то есть

$$\forall F \in (\mathcal{B}(X))^* \quad g(\lambda) = F(R(\lambda)) \text{ — аналитическая в } \mathbb{C} \text{ (целая)}$$

$$V(0) = -T \implies \exists T^{-1} \in \mathcal{B}(X) \xrightarrow[\text{сл. из т. Хана-Банаха}]{} \exists F \in (\mathcal{B}(X))^* : \quad g(0) \neq 0$$

Выберем $g(\lambda) = F(R(\lambda))$.

Таким образом, $g(z)$ — целая, g ограничена. Значит, по теореме Лиувилля, $g \equiv \text{const} = \lim_{g \rightarrow 0} g = 0$.

□

Пример. $Ix = x$

$$\sigma(I) = \{ 1 \} = \sigma_p(I)$$

$$(\lambda I - I) = (\lambda - 1)I \implies R(\lambda) = \frac{1}{\lambda - 1}I \quad \forall \lambda \neq 1$$

Теорема 30 (спектр и резольвента сопряжённого оператора).

1. X — банахово, $T \in \mathcal{B}(X)$

$$\implies \sigma(T^*) = \sigma(T)$$

Если $\lambda \in \rho(T)$, то

$$(R(\lambda, T))^* = R(\lambda, T^*)$$

2. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$, T — эрмитово-сопряжённый

$$\implies \sigma(T^*) = \{ \lambda \mid \bar{\lambda} \in \sigma(T) \}$$

Если $\lambda \in \rho(T)$, то

$$R(\lambda, T^*) = (R(\bar{\lambda}, T))^*$$

Доказательство.

1. X — банахово, $\lambda \in \rho(T)$

$$V(\lambda) = \lambda I - T \implies (V(\lambda))^* = \lambda I - T^*$$

$$\left((V(\lambda))^{-1} \right)^* = \left((V(\lambda))^* \right)^{-1}$$

2. X — гильбертово

$$(V(\lambda))^* = \bar{\lambda}I - T^*$$

□

62. Компактные операторы. Компактность оператора конечного ранга. Размерность замкнутого подпространства образа компактного оператора. Следствия

Определение 18. X, Y — банаховы, $T \in \mathcal{L}in(X, Y)$
 T называется *компактным*, если $T(B_1(0))$ относительно компактен.

Обозначение. $\text{Com}(X, Y)$ — множество компактных операторов.

Свойства.

1. $\text{Com}(X, Y) \subset \mathcal{B}(X, Y)$
2. $T \in \text{Com}(X, Y)$, $A \subset X$ ограничено
 $T(A)$ относительно компактно
3. $T \in \text{Com}(X, Y)$ тогда и только тогда, когда

$$\{x_n \in X\}_{n=1}^{\infty} \text{ — ограниченная} \implies \exists \{n_k\}_{k=1}^{\infty} : \exists \lim_{k \rightarrow \infty} T_{n_k} \in Y$$

Доказательство.

1. $T \in \text{Com}(X, Y)$

Обозначим $B = B_1^X(0)$.

$$\implies \overline{T(B)} \text{ — компакт} \implies T(B) \text{ ограничено} \implies T \in \mathcal{B}(X, Y)$$

□

Определение 19. X, Y — банаховы, $T \in \mathcal{B}(X, Y)$
 Если $\dim T(X) < +\infty$, то T называется *оператором конечного ранга*.

Пример. X, Y — банаховы, $f_1, \dots, f_n \in X^*$, $y_1, \dots, y_n \in Y$
 Для $x \in X$ определим

$$Tx = \sum_{j=1}^n f_j(x)y_j$$

$$T(x) \subset \mathcal{L}\{y_j\}_{j=1}^n \implies \dim T(X) \leq n \implies T \text{ — конечного ранга}$$

Все операторы конечного ранга имеют такой вид.

Утверждение 7. X, Y — банаховы, T — конечного ранга

$$T \in \text{Com}(X, Y)$$

Доказательство. $B := B_1^X(0)$

$$T(B) \subset T(X) \implies T(B) \text{ — ограниченное множество в конечномерном пр-ве} \implies \\ \implies T(B) \text{ относительно компактно}$$

□

Теорема 31. X, Y — банаховы, $T \in \text{Com}(X, Y)$, $L \subset T(X)$ — замкнутое подпространство

$$\dim L < +\infty$$

Доказательство.

- $T(X)$ — замкнутое подпространство Y

$$T \in \mathcal{B}(X, T(X)), \quad T(X) \text{ — банахово} \xrightarrow[\text{т. Банаха об откр. отобра.}]{=} T \text{ открыто} \implies$$

$$\exists r > 0 : \quad B_r^{T(X)}(0) \subset \underbrace{T(B)}_{\text{отн. комп.}} \implies B_r^{T(X)}(0) \text{ относительно компактно} \xrightarrow[\text{т. Рисса}]{=} \dim T(X) < +\infty$$

- $L \subset T(X)$ — замкнутое подпространство

Обозначим $X_1 = T^{-1}(L)$ (прообраз)

$$T \in \mathcal{B}(X, Y) \xrightarrow[L \text{ замкнуто}]{=} T^{-1}(L) \text{ замкнуто в } X \implies X_1 \text{ замкнуто} \implies X_1 \text{ — банахово}$$

По первой части доказательства

$$T(X_1) = L \implies \dim L < +\infty$$

□

Следствие. X — банахово, $T \in \text{Com}(X)$

1. Если $T(X) = X$, то $\dim X < +\infty$.
2. Если $\dim X = +\infty$, то $0 \in \sigma(T)$.

Доказательство.

1. Очевидно.
2. Пусть $0 \in \rho(T)$.

$$0 \in \rho(T) \iff V(0) = 0 \cdot I - T = -T \xrightarrow[\exists T^{-1}]{=} T(X) = X \quad \text{с первым пунктом}$$

□

63. Теорема об арифметических операциях с компактными операторами. Предел компактных операторов. Компактность эрмитово-сопряжённого оператора

Теорема 32.

1. X, Y — банаховы пространства

$$\text{Com}(X, Y) \text{ — замкнутое подпространство } \mathcal{B}(X, Y)$$

2. X, Y, Z — банаховы, $X \xrightarrow{T} Y \xrightarrow{S} Z$

$$(a) \quad T \in \text{Com}(X, Y), \quad S \in \mathcal{B}(Y, Z)$$

$$ST \in \text{Com}(X, Z)$$

$$(b) \quad T \in \mathcal{B}(X, Y), \quad S \in \text{Com}(Y, Z)$$

$$ST \in \text{Com}(X, Z)$$

Доказательство. Обозначим $B = B_1^X(0)$.

1.
 - $\alpha \in \mathbb{C}, \quad T \in \text{Com}(X, Y) \implies \alpha T \in \text{Com}(X, Y)$ — очевидно
 - Возьмём $T, S \in \text{Com}(X, Y)$.

$T(B)$ относительно компактно $\implies T(B)$ вполне ограничено. Возьмём $\varepsilon > 0$ и рассмотрим ε -сети:

$$\exists E \subset Y \text{ — конечная } \varepsilon\text{-сеть для } T(B)$$

$$\exists F \subset Y \text{ — конечная } \varepsilon\text{-сеть для } S(B)$$

$$\begin{aligned} E + F = \{ e + f \mid e \in E, f \in F \} &\text{ — конечное, } 2\varepsilon\text{-сеть для } T(B) + S(B) \implies \\ &\implies T(B) + S(B) \text{ относительно компактно} \end{aligned}$$

$$(T+S)(B) \subset T(B) + S(B) \implies (T+S)(B) \text{ относительно компактно} \implies T+S \in \text{Com}(X, Y)$$

$$\bullet \{ T_n \in \text{Com}(X, Y) \}_{n=1}^{\infty}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \|T_n - T\| = 0$$

Возьмём $\varepsilon > 0$.

$$\exists n \in \mathbb{N} : \quad \|T - T_n\| < \varepsilon$$

При этом, $T_n(B)$ относительно компактно.

$$\implies \exists E \text{ — конечная } \varepsilon\text{-сеть для } T_n(B)$$

Проверим, что E — ε -сеть для $T(B)$. Возьмём $x \in B$.

$$\exists e \in E : \quad \|T_n x - e\| < \varepsilon$$

$$\|Tx - e\| \stackrel{\Delta}{\leq} \|Tx - T_n x\| + \|T_n x - e\| \leq \underbrace{\|T - T_n\|}_{< \varepsilon} \cdot \underbrace{\|x\|}_{< 1} + \varepsilon < 2\varepsilon$$

Значит, $T(B)$ вполне ограничено и относительно компактно.

2. X, Y, Z

$$(a) \quad T \in \text{Com}(X, Y)$$

$$T(B) \text{ относительно компактно, } \quad S \in \mathcal{B}(Y, Z)$$

$$\xrightarrow[\text{непр. } S]{=} S(T(B)) \text{ относительно компактно} \implies ST \in \text{Com}(X, Z)$$

$$(b) \quad T \in \mathcal{B}(X, Y)$$

$$\implies T(B) \text{ ограничено, } \quad S \in \text{Com}(X, Y)$$

$$\implies S(T(B)) \text{ относительно компактно}$$

□

Следствие. X — банахово

Тогда $\text{Com}(X)$ — двусторонний замкнутый идеал алгебры $\mathcal{B}(X)$.

Про предел компактных операторов тоже нигде найти не могу...

Теорема 33. H — гильбертово

$$T \in \text{Com}(H) \iff T^* \in \text{Com}(H)$$

(T^* — эрмитово сопряжённый)

Доказательство.

$$\bullet \quad T \in \text{Com}(H)$$

Возьмём $x \in H$.

$$\|T^* x\|^2 = (T^* x, T^* x) = (TT^* x, x) \stackrel{\text{К-Б}}{\leq} \|TT^* x\| \cdot \|x\| \quad (5)$$

Возьмём $\{x_n \in H\}_{n=1}^{\infty}$ такую, что

$$\exists M > 0 : \quad \|x_n\| \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Проверим, что $\exists \{n_k\} : \exists \lim T^* x_{n_k}$.

$$\left. \begin{array}{l} T \in \text{Com}(H) \\ T^* \in \mathcal{B}(H) \end{array} \right\} \Rightarrow TT^* \in \text{Com}(H) \Rightarrow \exists \{n_k\} : \exists \lim TT^* x_{n_k} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{TT^* x_{n_k}\} \text{ фундаментальна}$$

$$\|T^* x_{n_k} - T^* x_{n_j}\|^2 = \|T^*(x_{n_k} - x_{n_j})\|^2 \stackrel{(5)}{\leq} \underbrace{\|(TT^*)(x_{n_k}) - TT^* x_{n_j}\|}_{\xrightarrow[k, j \rightarrow \infty]{} 0} \cdot \underbrace{\|x_{n_k} - x_{n_j}\|}_{\leq 2M} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{T^* x_{n_k}\} \text{ фундаментальна} \Rightarrow \exists \lim T^* x_{n_k} \Rightarrow T^* \in \text{Com}(H)$$

$$\bullet T^* \in \text{Com}(H) \Rightarrow T = T^{**} \in \text{Com}(H)$$

□

Замечание. X, Y — банаховы

$$T \in \text{Com}(X, Y) \iff T^* \in \text{Com}(Y^*, X^*)$$

Без доказательства.

□

64. Конечность числа линейно-независимых собственных векторов компактного оператора, соответствующих собственным числам, модули которых равномерно отделены от нуля. Следствия

Замечание (вспоминания из алгебры). X — линейное пространство, $T \in \mathcal{L}in(X)$, $\{\lambda_j\}_{j=1}^n$ — с. ч., $Tx_j = \lambda_j x_j$, $\lambda_j \neq \lambda_k$, x_j — с. в. ($x_j \neq 0$)

$$\Rightarrow \{x_j\} \text{ ЛНЗ}$$

Теорема 34. X — банахово, $T \in \text{Com}(X)$, $\lambda \in \sigma_p(T)$ — с. ч., $X_\lambda = \text{Ker}(\lambda I - T)$ — собств. подпр-во, $\delta > 0$

$$\sum_{\substack{\lambda \in \sigma_p(T) \\ |\lambda| \geq \delta}} \dim(X_\lambda) < +\infty$$

То есть, число линейно-независимых собственных векторов T , соответствующих собственным числам λ , таких, что $|\lambda| \geq \delta$, конечно.

Доказательство. Пусть $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ — ЛНЗ с. в.:

$$Tx_n = \lambda_n x_n, \quad |\lambda_n| \geq \delta$$

Рассмотрим последовательность подпространств:

$$L_n = \mathcal{L}\{x_j\}_{j=1}^n, \quad L_n \subsetneq L_{n+1}$$

$$\xRightarrow[\text{лемма Рисса}]{} \exists \{y_n\}_{n=1}^\infty : \|y_n\| = 1, \quad \rho(y_{n+1}, L_n) = \inf_{x \in L_n} \|y_{n+1} - x\| \geq \frac{1}{2}$$

(т. к. $\dim L_n = n$, то $\exists y_{n+1} : \rho(y_{n+1}, L_n) = 1$)

Проверим, что $\|Ty_n - Ty_m\| \geq \frac{\delta}{2}$. Тогда не будет существовать фундаментальной подпоследовательности $\{Ty_n\}$, а значит, и последовательности $\{n_k\}$ такой, что $\exists \lim Ty_{n_k} = \zeta$ с $T \in \text{Com}(X)$.

Пусть $y_n \in L_n$, $y_n \notin L_{n-1}$. Тогда $y_n = \alpha_n x_n + u_n$, $\alpha_n \neq 0$, $u_n \in L_{n-1}$.

$$Tx_n = \lambda_n x_n \implies Ty_n = \alpha_n \lambda_n x_n + Tu_n = \lambda_n (\alpha_n x_n + u_n) - \underbrace{\lambda_n u_n + Tu_n}_{=: v_n \in L_{n-1}} = \lambda_n y_n + v_n$$

Пусть $n > m$.

$$Ty_m \in L_n \subset L_{n-1}$$

$$\|Ty_n - Ty_m\| = \|\lambda_n y_n + v_n - Ty_m\| = |\lambda_n| \left\| y_n - \underbrace{\frac{1}{\lambda_n}(-v_n + Ty_m)}_{\in L_{n-1}} \right\| \geq \frac{\delta}{2}$$

Значит, последовательность y_n не содержит фундаментальных подпоследовательностей. \square

Следствие. $T \in \text{Com}$

1. $\delta > 0$

$$|\{ \lambda \in \sigma_p(T) \mid |\lambda| \geq \delta \}| < +\infty$$

2. $\lambda \in \sigma_p(T)$, $\lambda \neq 0$, $X_\lambda = \text{Ker}(\lambda I - T)$

$$\dim X_\lambda < +\infty$$

3. N — количество собственных чисел.

Тогда

(а) $0 \leq N \leq +\infty$ (т. е. $\sigma_p(T)$ не более, чем счётно);

(б) если $N = +\infty$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n = 0$.

Их можно занумеровать в порядке убывания модулей.

Доказательство.

1. Очевидно.

2. Очевидно.

3. $E_n := \{ \lambda \in \sigma_p(T) \mid |\lambda| \geq \frac{1}{n} \}$, $|E_n| < +\infty$

$$\sigma_p(T) \setminus \{0\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n \implies \sigma_p(T) \text{ не более, чем счётно}$$

$$\forall \delta > 0 \quad \{ \lambda \in \sigma_p(T) \mid |\lambda| > \delta \} \text{ конечно} \implies \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n = 0$$

\square

Часть IV

Теория Фредгольма

65. Условие разрешимости уравнения Фредгольма. Замкнутость образа оператора Фредгольма

Будем изучать гильбертовы пространства, так как там проще доказательства. Всё это верно и для банаховых пространств.

Определение 20. H — гильбертово, $T \in \text{Com}(H)$, $S = I - T$
 S будем называть *оператором Фредгольма*

Определение 21. Рассмотрим серию уравнений:

1. уравнение Фредгольма: $Sx = a$;
2. однородное уравнение Фредгольма: $Sx = 0$;
3. сопряжённое уравнение Фредгольма: $S^*y = h$;
4. однородное сопряжённое уравнение Фредгольма: $S^*y = 0$.

$$\lambda \in \mathbb{C} \neq 0, \quad V(\lambda) = \lambda I - T = \lambda \left(I - \frac{1}{\lambda} T \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} \in \text{Com}(H) \implies I - \frac{1}{\lambda} T - \text{оператор Фредгольма}$$

Значит, свойства S можно будет распространить на $V(\lambda)$.

Теорема 35. H — гильбертово, $T \in \text{Com}(H)$, $S = I - T$

1. $S(H)$ замкнуто;
2. $S^*(H)$ замкнуто;
3. $H = S(H) \oplus \text{Ker } S^*$;
4. $H = S^*(H) \oplus \text{Ker } S$.

Замечание. 3. и 4. эквивалентны тому, что

Уравнение $Sx = a$ разрешимо **для тех и только тех** a , которые ортогональны решениям однородного сопряжённого уравнения Фредгольма $S^*y = 0$.

Лемма 4 (об ограниченных прообразах). В условиях теоремы $\{y_n \in S(H)\}_{n=1}^\infty$ ограничена

$$\exists \{x_n\}_{n=1}^\infty : \quad \{x_n\} \text{ ограничена,} \quad Sx_n = y_n$$

Доказательство. $M = \text{Ker } S$, $L = M^\perp$, $H = M \oplus L$

$$S(M) = \{0\} \implies S(H) = S(L)$$

$$y \in S(H) \implies \exists! x \in L : \quad Sx = y$$

$$\forall y_n \quad \exists x_n \in L : \quad Sx_n = y_n$$

Проверим, что $\{x_n\}$ ограничена. **Пусть** это не так, т. е.

$$\exists \{n_k\}_{k=1}^\infty : \quad \lim \|x_{n_k}\| = +\infty$$

НУО будем считать, что сама последовательность $\{x_n\}$ обладает таким свойством:

$$\lim \|x_n\| = +\infty$$

Возьмём последовательность

$$\left\{ \frac{x_n}{\|x_n\|} \right\}_{n=1}^\infty$$

$$T \in \text{Com}(H) \implies \exists \{n_k\} : \quad \exists \lim T \left(\frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|} \right) =: z_0$$

$$\begin{aligned}
y_{n_k} = S(x_{n_k}) = x_{n_k} - T(x_{n_k}) &\implies \underbrace{\frac{y_{n_k}}{\|x_{n_k}\|}}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0} = \frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|} - \underbrace{T\left(\frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|}\right)}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} z_0} \implies \\
&\implies \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|} \right) = z_0 \xRightarrow{T \in \mathcal{B}(H)} \lim_{k \rightarrow \infty} T\left(\frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|}\right) = T(z_0) \implies \\
&\implies z_0 = T(z_0) \implies S(z_0) = z_0 - Tz_0 = 0 \implies z_0 \in M = \text{Ker } S
\end{aligned}$$

$$\frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|} \in L - \text{замкнуто}, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{x_{n_k}}{\|x_{n_k}\|} = z_0 \implies z_0 \in L, \quad \|z_0\| = 1$$

При этом, $z_0 \in L \cap M \implies z_0 = 0 - \nmid$.

□

Доказательство (теоремы).

1. Докажем, что $S(H)$ замкнуто. Возьмём $\{y_n \in S(H)\}_{n=1}^\infty$: $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = y_0$.

$$\exists \lim y_n \implies \{y_n\} \text{ ограничена} \xRightarrow{\text{лемма}} \exists \{x_n \in H\}: \{x_n\} \text{ ограничена}, \quad Sx_n = y_n$$

$$T \in \text{Com}(H) \implies \exists \{n_k\}: \lim T x_{n_k} = z_0$$

$$\underbrace{y_{n_k}}_{\rightarrow y_0} = S(x_{n_k}) = x_{n_k} - \underbrace{T x_{n_k}}_{\rightarrow z_0}$$

$$\implies \exists \lim_{k \rightarrow \infty} x_{n_k} = x_0 \xRightarrow{T \in \mathcal{B}(H)} \lim T(x_{n_k}) = T x_0$$

$$\implies z_0 = T x_0 \implies y_0 = x_0 - T x_0 = S(x_0) \implies y_0 \in S(H)$$

2. $S^* = I - T^*$, $T^* \in \text{Com}(H) \implies S^*(H)$ замкнуто.

3.

$$\forall A \in \mathcal{B}(H) \quad H = \overline{A(H)} \oplus \text{Ker } A^*$$

$$S(H) = \overline{S(H)} \implies H = S(H) \oplus \text{Ker } S^*$$

4. Аналогично.

□

66. Альтернатива Фредгольма: инъективность оператора Фредгольма эквивалентна его сюръективности

Лемма 5 (о стабилизации). $k \geq 0$, $H_{k+1} := S(H_k)$

$$\exists n \geq 0: \quad H_n = H_{n+1}$$

Доказательство. Допустим, что $H_{k+1} \subsetneq H_k$.

$$\implies H_k = H_{k+1} \oplus \underbrace{H_{k+1}^\perp}_{\text{ортогональное дополнение в } H_k}$$

$$\implies \exists x_k \in H_k: \quad \|x_k\| = 1, \quad x_k \perp H_{k+1}$$

Пусть $n > m$. Хотим оценить разность $\|Tx_n - Tx_m\|$.

$$Sx_n - Sx_m = x_n - Tx_n - x_m + Tx_m$$

$$Sx_n = x_n - Tx_n$$

$$\|Tx_n - Tx_m\| = \|x_n - Sx_n - x_m + Sx_m\| \geq 1$$

$$Sx_n \in H_{n+1}, \quad Sx_m \in H_{m+1}$$

$$x_n, Sx_n, Sx_m \in H_{m+1} \implies x_m \perp H_{m+1}$$

Значит, не существует $\{Tx_{n_k}\} : \exists \lim Tx_{n_k} = \not\in T \in \text{Com}(H)$. □

Теорема 36.

$$\text{Ker } S = \{0\} \iff S(H) = H$$

Другая формулировка. Оператор S — инъекция тогда и только тогда, когда S — сюръекция.

Другая формулировка.

- **Либо** уравнение Фредгольма разрешимо для любой правой части и решение единственно.
- **Либо** существует ненулевое решение однородного уравнения Фредгольма.

Доказательство.

• \implies

$\text{Ker } S = \{0\}$, т. е. S — инъекция.

Докажем, что $S(H) = H$. Пусть $S(H) \subsetneq H$, т. е. $\exists x \in H : x \notin S(H)$.

Подействуем на x оператором S :

$$Sx \in S(H), \quad S(Sx) \notin S(H)$$

(т. к. прообраз у элемента ровно один, и это — Sx)

$$\implies Sx \in S(H) \setminus S^2(H)$$

И так далее для любого n :

$$S^n x \in S^n(H) \setminus S^{(n+1)}(H)$$

Это противоречит лемме.

• \Leftarrow

$$\left. \begin{array}{l} S(H) = H \\ H = S(H) \oplus \text{Ker } S^* \end{array} \right\} \implies \text{Ker } S^* = \{0\} \xrightarrow[S^* = I - T^*]{\implies}$$

$$\implies S^* \text{ — оператор Фредгольма} \xrightarrow[\text{только что доказано}]{\implies} S^*(H) = H$$

$$H = S^*(H) \oplus \text{Ker } S \implies \text{Ker } S = \{0\}$$

□

67. Теорема о числе линейно-независимых решений однородного уравнения Фредгольма. Следствие о спектре компактного оператора

Теорема 37. $S = I - T, \quad T \in \text{Com}(H)$

$$\dim \text{Ker } S = \dim \text{Ker } S^* < +\infty$$

Другая формулировка. Однородные уравнения Фредгольма $Sx = 0$ и $S^*y = 0$ имеют одно и то же, и при том конечное, число ЛНЗ решений.

Доказательство. Пусть $\dim \text{Ker } S = n < +\infty$ (уже доказано для банахова пространства).

$$\dim \text{Ker } S^* =: m < +\infty$$

Пусть $n < m$.

Выберем в этих пространствах ОНБ:

$$\{e_i\}_{i=1}^n - \text{ОНБ } \text{Ker } S, \quad \{f_j\}_{j=1}^m - \text{ОНБ } \text{Ker } S^*$$

Определим $V : H \rightarrow \text{Ker } S^*$:

$$x \in H \quad Vx = \sum_{k=1}^n (x, e_k) f_k$$

$$V(H) \subset \text{Ker } S^* \implies \dim(V(H)) < +\infty \implies V - \text{конечного ранга} \implies V \in \text{Com}(H)$$

$$U := S + V = I - \underbrace{(T - V)}_{\in \text{Com}(H)} \implies U - \text{оператор Фредгольма}$$

Для U верна теор. 36. Проверим, что $\text{Ker } U = \{0\}$. Пусть $x \in \text{Ker } U$.

$$Ux = 0 \implies Sx + Vx = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} Sx \in S(H) \\ Vx \in \text{Ker } S^* \end{array} \right\} \xrightarrow{S(H) \perp \text{Ker } S^*} Sx \perp Vx \implies \begin{cases} Sx = 0 \\ Vx = 0 \end{cases}$$

$$Vx = \sum_{k=1}^n (x, e_k) f_k = 0 \implies (x, e_k) = 0 \quad \forall k \implies x \perp \text{Ker } S \xrightarrow{x \in \text{Ker } S} x = 0$$

По теор. 36 $U(H) = H$. Проверим, что это невозможно для $n+1$, т. е. что

$$f_{n+1} \notin U(H)$$

Возьмём $x \in H$.

$$Ux = Sx + Vx$$

$$f_{n+1} \in \text{Ker } S^* \implies f_{n+1} \perp S(H) \implies f_{n+1} \perp Sx$$

$$Vx = \sum (x, e_k) f_k \xrightarrow{f_{n+1} \perp f_k} f_{n+1} \perp Vx \implies f_{n+1} \in (U(H))^\perp = \{0\} - \text{?}$$

Тем самым, мы доказали, что

$$\dim \text{Ker } S \geq \dim \text{Ker } S^* \geq \dim \text{Ker } S^{**} = \dim \text{Ker } S$$

□

Следствие. $T \in \text{Com}(T)$

$$1. \lambda \neq 0, \quad \lambda \in \sigma(T)$$

$$\lambda \in \sigma_p(T)$$

$$2. \lambda \in \sigma_p(T), \quad H_\lambda = \text{Ker}(\lambda I - T), \quad Y_{\bar{\lambda}} = \text{Ker}(\bar{\lambda} I - T^*)$$

$$\dim H_\lambda = \dim Y_{\bar{\lambda}} < +\infty$$

$$3.$$

$$\sigma_p(T) \setminus \{0\} = \{\lambda_n\}_{n=1}^N$$

При этом, если $N = +\infty$, то

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n = 0$$

68. Простейшие свойства самосопряжённого оператора

Свойства. H — гильбертово, $T \in \mathcal{B}(H)$, $T = T^*$ (т. е. $(Tx, y) = (x, Ty)$)

$$1. (Tx, x) \in \mathbb{R} \quad \forall x;$$

$$2. \lambda \in \sigma_p(T) \implies \lambda \in \mathbb{R};$$

$$3. \lambda, \mu \in \sigma_p(T), \quad Tu = \lambda u, \quad Tv = \mu v$$

$$u \perp v$$

$$4. \|T\| = \sup_{\|x\|=1} |(Tx, x)|;$$

Доказательство.

1.

$$\left. \begin{aligned} (Tx, x) &= \overline{(x, Tx)} \\ (Tx, x) &= (x, Tx) \end{aligned} \right\} \implies (x, Tx) \in \mathbb{R}$$

2.

$$\lambda \in \sigma_p(T) \implies \exists u \neq 0$$

$$Tu = \lambda u \implies (Tu, u) = (\lambda u, u) \implies \lambda = \frac{(Tu, u)}{\|u\|^2} \in \mathbb{R}$$

$$3. Tu = \lambda u, \quad Tv = \mu v, \quad \lambda \neq \mu, \quad u, v \neq 0$$

$$\left. \begin{aligned} (Tu, v) &= (\lambda u, v) = \lambda(u, v) \\ (Tu, v) &= (u, Tv) = (u, \mu v) \stackrel{\mu \in \mathbb{R}}{=} \mu(u, v) \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\text{вычитаем}} \underbrace{(\lambda - \mu)}_{\neq 0}(u, v) = 0 \implies u \perp v$$

$$4. Q = \sup_{\|x\|=1} |(Tx, x)|$$

• Пусть $x \in H, \quad \|x\| = 1$.

$$|(Tx, x)| \stackrel{\text{К-Б}}{\leq} \|Tx\| \cdot \|x\| \leq \|T\| \cdot \underbrace{\|x\| \cdot \|x\|}_{=1} = \|T\| \quad \forall x: \|x\| = 1$$

$$\implies Q = \sup_{\|x\|=1} |(Tx, x)| \leq \|T\|$$

• Пусть $u \in H, \quad u \neq 0$.

$$\left\| \frac{u}{\|u\|} \right\| = 1 \implies \left| \left(T \left(\frac{u}{\|u\|} \right), \frac{u}{\|u\|} \right) \right| \leq Q \implies |(Tu, u)| \leq Q \|u\|^2 \quad \forall u \in H \quad (6)$$

Возьмём $x, y \in H$. Применим (6) к $(x + y)$ и к $(x - y)$:

$$\begin{aligned} (T(x + y), x + y) &= (Tx, x) + (Tx, y) + (Ty, x) + (Ty, y) \leq Q \|x + y\|^2 \\ -(T(x - y), x - y) &= -((Tx, x) - (Tx, y) - (Ty, x) + (Ty, y)) \leq Q \|x - y\|^2 \end{aligned}$$

Сложим эти два неравенства:

$$2((Tx, y) + (Ty, x)) \leq Q(\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2)$$

К правой части применим тождество параллелограмма, а левую преобразуем:

$$\begin{aligned} (Tx, y) + (Ty, x) &= (Tx, y) + (y, Tx) = (Tx, y) + \overline{(Tx, y)} = 2\Re(Tx, y) \implies \\ &\implies 4\Re(Tx, y) \leq Q \cdot 2(\|x\|^2 + \|y\|^2) \end{aligned}$$

Выберем $x: \quad \|x\| = 1$ такой, что $Tx \neq 0$.

$$y := \frac{Tx}{\|Tx\|} \implies \|y\| = 1$$

Подставим x, y в неравенство:

$$4\Re\left(Tx, \frac{Tx}{\|Tx\|}\right) \leq 4Q \implies \|Tx\| \leq Q \quad \forall x: \|x\| = 1 \implies \|T\| \leq Q$$

□

69. Существование собственного числа, модуль которого равен норме компактного самосопряжённого оператора

Определение 22. $T = T^*$

$$M := \sup_{\|x\|=1} (Tx, x), \quad m := \inf_{\|x\|=1} (Tx, x)$$

M и m называются *границами* оператора T .

Замечание.

$$\|T\| = \max\{|M|, |m|\}$$

Теорема 38. H — гильбертово, $T = T^*$, $T \in \text{Com}(H)$

$$\exists \lambda \in \sigma_p(T) : |\lambda| = \|T\|$$

Доказательство.

- $\|T\| = |M|$

$$M = \sup_{\|x\|=1} (Tx, x) \implies \exists \{x_n\}_{n=1}^\infty : \|x_n\| = 1, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} (Tx_n, x_n) = M$$

$$\left. \begin{array}{l} m \leq M \\ \max\{|M|, |m|\} = |M| \end{array} \right\} \implies M > 0$$

$$T \in \text{Com}(H) \implies \exists \{n_k\}_{k=1}^\infty : \exists \lim_{k \rightarrow \infty} Tx_{n_k} = y$$

Переименуем: $\lim_{n \rightarrow \infty} Tx_n = y$. Проверим, что y — с. в. T и $Ty = My$.

$$\begin{aligned} 0 \leq \|Tx_n - M \cdot x_n\|^2 &= (Tx_n - Mx_n, Tx_n - Mx_n) = \\ &= \|Tx_n\|^2 - \underbrace{M(Tx_n, x_n)}_{\rightarrow M} - \underbrace{M(x_n, Tx_n)}_{\rightarrow M} + M^2 \underbrace{\|x_n\|^2}_{=1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \|y\|^2 - M^2 \implies \|y\| \geq M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \|y\| &= \lim \|Tx_n\| \leq \|T\| \cdot \|x_n\| = \|T\| = M \implies \|y\| \leq M \\ &\implies \lim M \cdot x_n = \lim Tx_n = y \end{aligned}$$

Воспользуемся тем, что T непрерывен:

$$M \cdot \lim x_n = y \implies M \underbrace{\lim Tx_n}_{=y} = Ty \implies Ty = My, \implies M \in \sigma_p(T), \quad M = \|T\|$$

- $\|T\| = |m|$

Рассмотрим оператор $T_1 = -T$.

$$\sup_{\|x\|=1} (T_1x, x) = -m \implies \exists y \neq 0 : T_1y = -my \implies Ty = my$$

□

70. Теорема Гильберта—Шмидта о представлении компактного самосопряжённого оператора в виде суммы ортогональных проекторов

Теорема 39. H — гильбертово, $T = T^*$, $T \in \text{Com}(H)$, $\sigma(T) \setminus \{0\} = \{\lambda_n\}_{n=1}^{0 \leq N \leq +\infty}$, $\lambda_n \in \sigma_p(T)$, $H_{\lambda_n} = \text{Ker}(\lambda_n I - T)$, $\dim H_{\lambda_n} < +\infty$, P_n — ортогональный проектор на H_{λ_n}

$$\implies T = \sum_{k=1}^N \lambda_k P_k$$

Если $N = +\infty$, то

$$\left\| T - \sum_{k=1}^n \lambda_k P_{\lambda_k} \right\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Доказательство. Возьмём $\lambda \neq 0$ из σ_p . Рассмотрим $\tilde{T} = T - \lambda P_\lambda$ (P_λ — ортогональный проектор на собственное подпространство H_λ).

$$L := H_\lambda^\perp$$

$$\tilde{T}|_{H_\lambda} = 0 \implies H_\lambda \in \text{Ker } \tilde{T}$$

$$T^* = T \implies (\tilde{T})^* = \tilde{T}$$

При этом, компактность сохраняется: $\tilde{T} \in \text{Com}(H)$.

Рассмотрим $\mu \neq \lambda$ из $\sigma_p(T)$.

$$H_\mu \perp H_\lambda \implies H_\mu \subset L \implies \mu \in \sigma_p(\tilde{T}), \quad \text{Ker}(\mu I - \tilde{T}) = \text{Ker}(\mu I - T)$$

$$\text{Ker } \tilde{T} = \text{Ker } T \oplus H_\lambda$$

По предыдущей теореме,

$$\exists \lambda_1 : |\lambda_1| = \|T\|$$

Уже доказано, что $\sigma(T) \subset \{ \lambda \in \mathbb{C} \mid |\lambda| \leq \|T\| \}$. Значит, λ_1 — максимальное по модулю.

- Если $\lambda_1 = 0$, то $T = \mathbb{O}$.
- Если $\|T\| > 0$, то рассмотрим $T_1 = T - \lambda_1 \cdot P_1$.

По одному из простейших свойств самосопряжённого оператора, $|\lambda_1| = \sup_{\|x\|=1} |(Tx, x)|$.

Можем вычислить $|\lambda_2|$:

$$|\lambda_2| = \sup_{\|x\|=1} |(T_1 x, x)| = \sup_{\substack{\|x\|=1, \\ x \perp H_{\lambda_1}}} |(Tx, x)|$$

Кроме того, $|\lambda_2| = \|T_1\|$.

И так далее по индукции.

- Если $\exists N : T_N = 0$, то

$$T = \sum_{k=1}^{N-1} \lambda_k P_k$$

- Иначе:

$$\left\| T - \sum_{k=1}^{N-1} \lambda_k P_k \right\| = |\lambda_N|$$

Но $\lim_{N \rightarrow \infty} \lambda_N = 0$, значит, $T = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k P_k$

□

71. Теорема Гильберта—Шмидта о существовании ОНБ из собственных векторов компактного самосопряжённого оператора

Теорема 40. H — гильбертово, сепарабельно, $T = T^*$, $T \in \text{Com}(H)$

Тогда существует $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ — ОНБ из собственных векторов T .

Доказательство.

$$\sigma_p(T) \setminus \{0\} = \{\lambda_n\}_{n=1}^N, \quad |\lambda_1| \geq |\lambda_2| \geq \dots$$

Если $N = \infty$, то $\lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n = 0$, $0 \leq N \leq +\infty$.

$$H_n = \text{Ker}(\lambda_n I - T)$$

$$\dim H_n = m_n, \quad 1 \leq n < +\infty$$

Пусть $\{e_{n,j}\}_{j=1}^N$ — ОНБ в H_n .

$$L := \mathcal{L}\{e_{n,j}\}_{n=1}^N, \quad 1 \leq j \leq m_n$$

$$M := L^\perp, \quad H = L \oplus M$$

Проверим, что $M = \text{Ker } T$.

$$H_0 := \text{Ker}(0 \cdot I - T) = \text{Ker } T = H_0 \perp H_{\lambda_n} \quad \forall n \geq 1$$

$$x \in H_0 \implies x \in M, \quad \text{Ker } T \subset M$$

(H_λ все друг другу ортогональны; ноль — частный случай)

Возьмём $z \in M$.

$$z \perp H_{\lambda_n} \quad \forall n \geq 1 \implies P_z = 0 \xrightarrow[\text{т. Г.-Ш. о предст. опер.}]{\implies} Tz = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n P_H = 0 \implies z \in \text{Ker } T$$

$$H \text{ сепарабельно} \implies H_0 \text{ сепарабельно} \implies \exists \{e_{0,j}\}_{n=0, 1 \leq j \leq m_n}^N \text{ — ОНБ в } H$$

□

Замечание. H — гильбертово пространство

Тогда существует ОНБ в $\overline{T(H)}$ из собственных векторов T .

Доказательство.

$$H = \overline{T(H)} \oplus \text{Ker } T^* \xrightarrow[T=T^*]{\implies} H = \overline{T(H)} \oplus \text{Ker } T \implies L = \overline{T(H)}$$

Для $x \in \overline{T(H)}$

$$x = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{m_n} (x, e_{n,j}) e_{n,j}$$

□

72. Компактность интегрального оператора с ядром из L^2

Теорема 41. $L^2(X, \mu)$, $L^2(Y, \nu)$ сепарабельны, $K(x, y) \in L^2(X \times Y)$

$$(\mathcal{K}f)(x) = \int_Y K(x, y) f(y) d\nu$$

$$\implies \mathcal{K} \in \text{Com}(L^2(Y), L^2(X))$$

Доказательство. Пусть $\{\varphi_n(x)\}_{n=1}^\infty$ — ОНБ в $L^2(X, \mu)$, $\{\psi_j(y)\}_{j=1}^\infty$ — ОНБ в $L^2(Y, \nu)$.

Проверим, что $\{\varphi_n(x), \psi_j(y)\}_{n,j \in \mathbb{N}}$ — ОНБ в $L^2(X, Y)$.

$$\int_X \varphi_n(x) \overline{\varphi_m(x)} d\mu = \begin{cases} 1, & n = m, \\ 0, & n \neq m, \end{cases} \quad \int_Y \psi_i(y) \overline{\psi_k(y)} d\nu = \begin{cases} 0 & j \neq k, \\ 1, & j = k. \end{cases}$$

- Проверим ортогональность

$$\begin{aligned} \iint_{X \times Y} \varphi_n(x) \psi_i(y) \overline{\varphi_m(x) \psi_k(y)} \, d\mu \, d\nu &= \int_X \varphi_n \overline{\varphi_m} \, d\mu \int_Y \psi_j \overline{\psi_k} \, d\nu = \begin{cases} 1, & m = n, \, j = k, \\ 0 & \end{cases} \implies \\ &\implies \{ \varphi_n(x), \psi_j(y) \} - \text{ОС} \end{aligned}$$

- Проверим полноту

Возьмём $f \in L^2(X \times Y)$. Пусть $f \perp \{ \varphi_n(x), \psi_j(y) \}_{n,j \in \mathbb{N}}$.

$$\iint_{X \times Y} f(x, y) \overline{\varphi_n(x) \psi_j(y)} \, d\mu \, d\nu = 0 \quad \forall n, k$$

Зафиксируем n .

$$\int_Y \left(\int_X f(x, y) \overline{\varphi_n(x)} \, d\mu \right) \overline{\psi_k(y)} \, d\nu = 0$$

$$\int_X f(x, y) \overline{\varphi_n} \, d\mu \perp \psi_k(y) \quad \forall k \implies \int_X f(x, y) \overline{\varphi_n} \, d\mu = 0 \text{ п. в. по } \nu \implies$$

$$\implies f(x, y) = 0 \text{ п. в. по } \mu \implies f = 0 \text{ в } L^2(X \times Y), \quad K(x, y) = \sum_{1 \leq i, j < +\infty} \alpha_{ij} \varphi_i(x) \psi_j(y)$$

Рассмотрим частичные суммы:

$$K_n(x, y) = \sum_{\substack{1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq n}} \alpha_{ij} \varphi_i(x) \psi_j(y)$$

$$\lim \|K(x, y) - K_n(x, y)\| = 0$$

Уже доказано, что

$$\|\mathcal{K}\|_{\mathcal{B}(L^2(Y), L^2(X))} \leq \|K(x, y)\|_{L^2(X \times Y)}$$

Возьмём $f \in L^2(Y, \nu)$.

$$(\mathcal{K}_n f) = \int_Y K_n(x, y) f(y) \, d\nu = \sum_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} \alpha_{ij} \varphi_i(x) \int_Y f(y) \psi_j(y) \, d\nu$$

$$L_n := \mathcal{L} \{ \varphi_j \}_{j=1}^n, \quad \dim L_n = n, \quad \mathcal{K}_n(f) \in L_n$$

Значит, \mathcal{K}_n — оператор конечного ранга.

$$\implies \mathcal{K}_n \in \text{Com}(L^2(Y), L^2(X))$$

$$\|\mathcal{K} - \mathcal{K}_n\|_{\mathcal{B}(L^2(Y), L^2(X))} \leq \|K(x, y) - K_n(x, y)\| \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L^2(X \times Y)} 0$$

Операторы компактные, значит, их предел по норме тоже компактен. □

Следствие. $L^2(X, \mu)$ сепарабельно, $K(x, y) \in L^2(X \times X)$, $K(y, x) = \overline{K(x, y)}$

$$\mathcal{K} \in \text{Com}(L^2(X))$$