

Содержание

1	Метрические пространства	2
1.1	Определения	2
1.2	Несложные утверждения	3
2	Полные метрические пространства	4
2.1	Теорема о вложенных шарах, теорема Бэра	4
2.2	Принцип сжимающих отображений.	5
3	Компактные метрические пространства	6
3.1	Компактность и центрированные системы замкнутых множеств	6
3.2	Критерий компактности	7
3.3	Теорема Арцела-Асколи	8
4	Линейные нормированные пространства	10
4.1	Теорема Рисса	10
4.2	Характеристическое свойство евклидовых пространств.	12
4.3	Эквивалентность норм в конечномерном пространстве.	12
4.4	Теорема Рисса о проекции	13
4.5	Сепарабельные гильбертовы пространства	15
5	Линейные ограниченные операторы в линейных нормированных пространствах	16
5.1	Связь непрерывности и ограниченности линейного оператора	16
5.2	Топологии и сходимости в пространстве операторов.	17
5.3	Задача о продолжении непрерывного отображения	19
5.4	Теорема Банаха-Штейнгауза	20
5.5	Полнота пространства.	20

1 Метрические пространства

1.1 Определения

Определение 1.1. Метрическим пространством называется множества X с функцией $\rho : X^2 \rightarrow \mathbb{R}$, обладающей следующими свойствами:

1. $\forall x, y \in X : \rho(x, y) \geq 0$, причём $\rho(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
2. $\forall x, y \in X : \rho(x, y) = \rho(y, x)$
3. $\forall x, y, z \in X : \rho(x, z) \leq \rho(x, y) + \rho(y, z)$ (неравенство треугольника).

Функция ρ называется метрикой на множестве X .

Определение 1.2. Топологическим пространством называется множество X с системой $\tau \subseteq 2^X$, обладающей следующими свойствами:

1. $\emptyset, X \in \tau$
2. $\forall G_1, G_2 \in \tau : G_1 \cap G_2 \in \tau$
3. $\forall \{G_\alpha\}_{\alpha \in A} \subset \tau : \bigcup_{\alpha \in A} G_\alpha \in \tau$

Система τ называется топологией на множестве X , а элементы системы τ – открытыми множествами.

Определение 1.3. Пусть X – метрическое пространство, $Y \subset X$. Подпространством пространства X называется метрическое пространство Y с метрикой, являющейся сужением метрики на X .

Определение 1.4. Пусть X – метрическое пространство. Множество $Y \subset X$ называется ограниченным, если выполнено условие $\sup_{x, y \in Y} \rho(x, y) < +\infty$

Определение 1.5. Пусть X – метрическое пространство, $x \in X, r > 0$:

- Открытым шаром называется множество

$$B(x, r) := \{y \in X \mid \rho(y, x) < r\}$$

- Замкнутым шаром называется множество

$$\overline{B}(x, r) := \{y \in X \mid \rho(y, x) \leq r\}$$

Определение 1.6. Пусть X – метрическое пространство, $M \subset X$. Точка $x \in X$ называется внутренней точкой множества M , если существует $r > 0$ такое, что $B(x, r) \subset M$. Внутренностью множества M называется множество $\text{int } M$ всех его внутренних точек. Множество M называется открытым, если $\text{int } M = M$.

Определение 1.7. Пусть (X, ρ) – метрическое пространство, $M \subset X$. Точка $x \in X$ называется точкой прикосновения множества M , если для любого $r > 0$ выполнено условие $B(x, r) \cap M \neq \emptyset$. Замыканием множества M называется множество \overline{M} всех его точек прикосновения. Множество M называется замкнутым, если $\overline{M} = M$.

Определение 1.8. Пусть X – метрическое пространство. Множество $A \subset X$ называется:

- Плотным в множестве $B \subset X$, если $B \subset \overline{A}$
- Всюду плотным, если $X = \overline{A}$

Определение 1.9. Метрическое пространство X называется сепарабельным, если в X существует не более чем счётное всюду плотное множество.

Определение 1.10. Пусть X – метрическое пространство. Последовательность $\{x_n\} \subset X$ сходится к точке $x \in X$, если $\rho(x_n, x) \rightarrow 0$ при $n \rightarrow +\infty$. Обозначение:

$$x_n \rightarrow_X x$$

Определение 1.11. Пусть X, Y – метрические пространства. $f : X \rightarrow Y$. Отображение f называется непрерывным в точке $x \in X$, если выполнено одно из следующих условий:

1. Для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$ такое, что $f(B(x, \delta)) \subset B(f(x), \varepsilon)$
2. Для любой $\{x_n\} \subset X$ такой, что $x_n \rightarrow_X x$, выполнено $f(x_n) \rightarrow_Y f(x)$

1.2 Несложные утверждения

Лемма 1.1. *Неравенство Минковского.*

Пусть E – измеримое множество, на котором задана мера μ , и пусть $f, g : E \rightarrow \mathbb{R}$ – измеримые функции. Тогда выполнено следующее:

$$\left(\int_E |f(x) + g(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\int_E |f(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_E |g(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}$$

Лемма 1.2. *Неравенство Гёльдера.*

Пусть E измеримое множество, на котором задана мера μ . Тогда для любых $p, q \geq 1, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, если $f \in L^p(E), g \in L^q(E)$, то $f \cdot g \in L^1$, причём выполнено следующее:

$$\int_E |f(x)g(x)| d\mu \leq \left(\int_E |f(x)|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(\int_E |g(x)|^q d\mu \right)^{\frac{1}{q}}$$

Лемма 1.3. Пусть X – метрическое пространство, $M \subset X$. Тогда множество M открыто \Leftrightarrow множество $X \setminus M$ замкнуто.

Доказательство. Достаточно заметить, что

$$x \in \overline{X \setminus M} \Leftrightarrow \forall r > 0 : B(x, r) \cap (X \setminus M) \neq \emptyset \Leftrightarrow x \notin \text{int } M$$

Значит, $\text{int } M = M \Leftrightarrow \overline{X \setminus M} = X \setminus M$. □

Лемма 1.4. Пусть X – метрическое пространство. Тогда:

1. Для любого $x \in X$ и $r > 0$ множество $B(x, r)$ – открытое.
2. Для любого $x \in X$ и $r > 0$ множество $\overline{B}(x, r)$ – замкнутое.

3. Для любого множества $M \subset X$ множество $\text{int } M$ – открытое, причём наибольшее по включению открытое множество, содержащееся в M .
4. Для любого множества $M \subset X$ множество \overline{M} – замкнутое, причём наименьшее по включению замкнутое множество, содержащее M .

Доказательство. 1. Пусть $y \in B(x, r)$, тогда, по неравенству треугольника, $B(y, r - \rho(x, y)) \subset B(x, r)$, то есть $y \in \text{int } B(x, r)$.

2. Пусть $y \in \overline{B(x, r)}$, тогда для любого $\varepsilon > 0$ выполнено $B(y, \varepsilon) \cap \overline{B(x, r)} \neq \emptyset$, откуда, по неравенству треугольника, $\rho(x, y) < r + \varepsilon$. В силу произвольности числа ε , получаем, что $\rho(x, y) \leq r$, то есть $y \in \overline{B(x, r)}$.

3. Для любого открытого множества $G \subset M$ выполнено $G = \text{int } G \subset \text{int } M$, поэтому, в частности, множество $\text{int } M$ открыто, как объединение всех содержащихся в M открытых множеств.

4. Для любого замкнутого множества $F \supset M$ выполнено $F = \overline{F} \supset \overline{M}$, поэтому, в частности, множество \overline{M} замкнуто, как пересечение всех содержащих M замкнутых множеств.

□

Лемма 1.5. Пусть X, Y – метрические пространства, $f : X \rightarrow Y$. Тогда следующие условия эквивалентны:

- Отображение f непрерывно.
- Для любого открытого множества $G \subset Y$ множество $f^{-1}(G)$ тоже является открытым

Доказательство. • $(1 \Rightarrow 2)$ Зафиксируем произвольное открытое множество $G \subset Y$. Тогда, поскольку выполнено равенство $f^{-1}(G) = \bigcup_{y \in G} f^{-1}(y)$ и каждое множество $f^{-1}(y)$ является открытым (из определения непрерывности), множество $f^{-1}(G)$ тоже является открытым.

- $(2 \Rightarrow 1)$ Зафиксируем произвольные $x \in X, \varepsilon > 0$. Множество $B(f(x), \varepsilon)$ является открытым, поэтому его прообраз тоже открыт, то есть существует $\delta > 0$ такое, что $f(B(x, \delta)) \subset B(f(x), \varepsilon)$, что и даёт требуемое в силу произвольности выбора точки x и числа ε .

□

2 Полные метрические пространства

2.1 Теорема о вложенных шарах, теорема Бэра

Определение 2.1. Пусть X – метрическое пространство. Последовательность $\{x_n\} \subset X$ называется фундаментальной, если выполнено следующее условие:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n, m \geq N : \rho(x_n, x_m) < \varepsilon$$

Определение 2.2. Метрическое пространство называется полным, если любая фундаментальная последовательность в нём сходится.

Теорема 2.1. *О вложенных шарах.*

Пусть X – полное метрическое пространство. $\{\overline{B}(x_n, r_n)\}_{n=1}^{\infty}$ – последовательность вложенных замкнутых шаров такая, что $r_n \rightarrow 0$. Тогда $\bigcap_{n=1}^{\infty} \overline{B}(x_n, r_n) = \{x^*\}$ для некоторой точки $x^* \in X$.

Доказательство. В силу вложенности шаров и условия $r_n \rightarrow 0$, последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ фундаментальна. Тогда, поскольку пространство X полно, для некоторого $x^* \in X$ выполнено $x_n \rightarrow x^*$. Но каждый шар $\overline{B}(x_N, r_N)$ содержит все точки из последовательности $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, начиная с номера N , тогда, в силу его замкнутости, он также содержит точку x^* .

Значит, $\{x^*\} \subset \bigcap_{n=1}^{\infty} \overline{B}(x_n, r_n)$. Наконец, в силу условия $r_n \rightarrow +0$, других точек в пересечении быть не может. \square

Теорема 2.2. *Теорема Бэра.*

Пусть X – полное метрическое пространство. Тогда X нельзя представить в виде $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} M_n$, где множества $M_n \subset X$ – не плотные ни в одном шаре в X (нигде не плотные).

Доказательство. Предположим противное, то есть X имеет такой вид, как в условии. Положим $r_0 := 1$ и выберем произвольный шар $\overline{B}(x_0, r_0) \subset X$. Поскольку M_1 неплотно в $\overline{B}(x_0, r_0)$, то

$$(X \setminus \overline{M}_1) \cap \overline{B}(x_0, r_0) \neq \emptyset$$

, поэтому можно выбрать шар

$$\overline{B}(x_1, r_1) \subset \overline{B}(x_0, r_0) : \overline{B}(x_1, r_1) \cap \overline{M}_1 = \emptyset$$

Можно считать, что $r_1 \leq \frac{1}{2}$. Повторим данное упражнение счётное количество раз...

Рассмотрим полученную последовательность вложенных шаров $\{\overline{B}(x_n, r_n)\}_{n=1}^{\infty}$. Поскольку $r_n \leq \frac{1}{2^n} \rightarrow 0$, то, по предыдущей теореме, для некоторой точки $x^* \in X$ выполнено равенство

$$\{x^*\} = \bigcap_{n=0}^{\infty} \overline{B}(x_n, r_n)$$

По предположению, $X = \bigcup M_n$, поэтому $\exists n : x^* \in M_n$, но по построению

$$\overline{B}(x^*, r_n) \cap \overline{M}_n = \emptyset$$

противоречие. \square

2.2 Принцип сжимающих отображений.

Теорема 2.3. *Теорема Банаха. Принцип сжимающих отображений.*

Пусть X – полное метрическое пространство, $f : X \rightarrow X$ – отображение такое, что выполнено следующее условие:

$$\exists \alpha \in (0, 1) \forall x, y \in X : \rho(f(x), f(y)) \leq \alpha \rho(x, y)$$

Тогда

$$\exists! x^* : f(x^*) = x^*$$

Доказательство. Существование. Зафиксируем $x_0 \in X$ и рассмотрим последовательность $\{x_n\}_{n=1}^\infty$, где $x_{n+1} = f(x_n)$. Поскольку для $k \in \mathbb{N}$ выполнено:

$$\rho(x_{k+1}, x_k) = \rho(f(x_k), f(x_{k-1})) \leq \alpha \rho(x_k, x_{k-1}) = \alpha \rho(f(x_{k-1}), f(x_{k-2})) \leq \dots \leq \alpha^k \rho(x_1, x_0)$$

то по неравенству треугольника получаем

$$\rho(x_{n+p}, x_n) \leq \rho(x_{n+p}, x_{n+p-1}) + \dots + \rho(x_{n+1}, x_n) \leq (\alpha^{n+p-1} + \dots + \alpha^n) \rho(x_1, x_0) \leq \frac{\alpha^n}{1 - \alpha} \rho(x_1, x_0)$$

Так как $\alpha^n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$, то $\{x_n\}_{n=1}^\infty$ фундаментальна. Значит, из полноты пространства,

$$\exists \lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = x^*$$

Переходя к пределу в равенстве $x_{n+1} = f(x_n)$ и пользуясь непрерывностью f , получаем $f(x^*) = x^*$.

Единственность. Предположим, что

$$\exists y^* \neq x^* : f(y^*) = y^* \Rightarrow \rho(x^*, y^*) = \rho(f(x^*), f(y^*)) \leq \alpha \rho(x^*, y^*)$$

Это возможно лишь когда $\rho(x^*, y^*) = 0 \Rightarrow x^* = y^*$. □

3 Компактные метрические пространства

3.1 Компактность и центрированные системы замкнутых множеств

Определение 3.1. Метрическое пространство X называется компактным, если

$$\forall \{G_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}} \subset 2^X : \bigcup_{\alpha \in \mathcal{A}} G_\alpha = X : \exists \{\alpha_i\}_{i=1}^n \subset \mathcal{A} : \bigcup_{i=1}^n G_{\alpha_i} = X$$

Определение 3.2. Пусть X – метрическое пространство. Система $\{B_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}} \subset 2^X$ называется центрированной, если

$$\forall \{\alpha_i\}_{i=1}^n \subset \mathcal{A} : \bigcap_{i=1}^n B_{\alpha_i} \neq \emptyset$$

Теорема 3.1. Метрическое пространство X компактно \Leftrightarrow любая центрированная система замкнутых множеств в X имеет непустое пересечение.

Доказательство. Каждой системе открытых множеств $\{G_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}} \subset 2^X$ можно поставить в соответствие систему замкнутых множеств $\{F_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}} := \{X \setminus G_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}}$ и наоборот.

Тогда любая система открытых множеств $\{G_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}}$, не содержащая конечного подпокрытия, не является покрытием \Leftrightarrow любая центрированная система замкнутых множеств $\{F_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}}$ имеет непустое пересечение (накиньте на одну из частей утверждения дополнения и поймите, что это одно и то же). □

3.2 Критерий компактности

Определение 3.3. Пусть M – некоторое множество в метрическом пространстве R . Тогда множества A из R называются ε -сетью для M , если

$$\forall x \in M \exists a \in A : \rho(x, a) \leq \varepsilon$$

Определение 3.4. Множество M в метрическом пространстве R называется ограниченным, если существует $B_\varepsilon(x_0)$ содержащий M .

Определение 3.5. Множество M в метрическом пространстве R называется вполне ограниченным, если для него при любом $\varepsilon > 0$ существует конечная ε -сеть.

Лемма 3.1. Из вполне ограниченности следует ограниченность.

Доказательство. Из вполне ограниченности ограниченность следует получается, как объединение конечного числа ограниченных множеств. \square

Теорема 3.2. Критерий компактности.

Пусть X – метрическое пространство. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. X компактно.
2. X полно и вполне ограничено.
3. Из любой последовательности $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$ можно выделить сходящуюся подпоследовательность $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$, ещё говорят, что X – секвенциально компактно.
4. Любое бесконечное множество $M \subset X$ имеет предельную точку.

Доказательство. • $(1 \Rightarrow 2)$ X вполне ограничено, поскольку для любого $\varepsilon > 0$ из открытого покрытия $\{B(x, \varepsilon)\}_{x \in X}$ по определению можно выделить конечное подпокрытие. Центры шаров этого подпокрытия и будут давать требуемую ε -сеть.

Пусть последовательность $\{x_n\} \subset X$ фундаментальна. Для каждого $n \in \mathbb{N}$ положим $A_n := \{x_n, x_{n+1}, \dots\}$, тогда система $\{\overline{A_n}\}$ является центрированной системой замкнутых множеств. Система центрирована, потому что у любого конечного набора пересечением будет являться хвост, начинающийся с максимального из взятых индексов.

Поэтому можно выбрать точку $x_0 \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}_+} \overline{A_n}$, причём $x_0 \in X$ по рассмотренному выше критерию компактности. В силу фундаментальности

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n > N : \overline{A_n} \subset \overline{B}(x_N, \varepsilon)$$

откуда и $\rho(x_n, x_0) < \varepsilon \Rightarrow x_n \rightarrow_X x_0$.

- $(2 \Rightarrow 3)$ Зафиксируем произвольную последовательность $\{x_n\}_{n=1}^\infty \subset X$. Поскольку X вполне ограничено, то

$$\forall \varepsilon > 0 \exists y \in X : |\{x_n\}_{n=1}^\infty \cap B(y, \varepsilon)| = +\infty$$

Будем применять это рассуждение сначала для всего пространства X , потом для шаров в X , содержащих бесконечно много точек из $\{x_n\}_{n=1}^\infty$:

- Для $\varepsilon := 1$ выберем $\{x_k^1\} \subset \{x_n\}$ так, что $\{x_k^1\} \subset B(y_1, 1)$
- Для $\varepsilon := \frac{1}{2}$ выберем $\{x_k^2\} \subset \{x_n^1\} \subset B(y_1, 1)$ так, что $\{x_k^2\} \subset B(y_2, \frac{1}{2})$
- ...

Рассмотрим диагональную последовательность $\{x_k^k\} \subset \{x_n\}$. По построению, она является фундаментальной, и в силу полноты пространства X , она сходится.

- (3 \Rightarrow 1) Проверим сначала, что X вполне ограничено. Предположим противное, то есть

$$\exists \varepsilon_0 > 0 \forall \{\bar{B}(y_n, \varepsilon_0)\}_{n=1}^N : \bigcup_{n=1}^N \bar{B}(y_n, \varepsilon_0) \not\supset X$$

Тогда можно выбрать точку $x_1 \in X$, затем точку $x_2 \in (X \setminus B(x_1, \varepsilon_0))$. По предположению, остаток, из которого берём элементы последовательности, никогда не будет пуст, поэтому получим последовательности с попарными расстояниями между точками не меньше ε_0 , из которой, очевидно, нельзя выделить сходящуюся подпоследовательность – противоречие.

Теперь проверим, что X компактно. Предположим противное, то есть

$$\exists \{G_\alpha\}_{\alpha \in \mathcal{A}}, G_\alpha - \text{открытое} \forall \{G_{\alpha_i}\}_{i=1}^N : \bigcup_{i=1}^N G_{\alpha_i} \not\supset X$$

Значит,

$$\forall \varepsilon > 0 \exists x \in X \forall \{G_{\alpha_i}\}_{i=1}^N : \bigcup_{i=1}^N G_{\alpha_i} \not\supset B(x, \varepsilon)$$

(если такого шара нет, то из вполне ограниченности, складывая конечные покрытия конечного числа шаров, получим конечное покрытие всего множества).

Выбирая такую точку x_n для $\varepsilon := \frac{1}{n}$ при каждом $n \in \mathbb{N}$, получим последовательность $\{x_n\}_{n=1}^\infty$, из которой можно выделить сходящуюся подпоследовательность $\{x_{n_k}\}_{k=1}^\infty$. Пусть $x_{n_k} \rightarrow_X x_0 \in X$. Тогда существует $\alpha_0 \in \mathcal{A}$ такое, что $x_0 \in G_{\alpha_0}$. Но множество G_{α_0} открыто, поэтому оно покрывает некоторую окрестность точки x_0 , а значит и все шары $B(x_{n_k}, \frac{1}{n_k})$, начиная с некоторого номера – противоречие.

- (3 \Rightarrow 4) Зафиксируем бесконечное множество $M \subset X$, тогда, выбирая произвольным образом последовательность $\{x_n\} \subset M$ и выделяя из неё сходящуюся подпоследовательность, получим требуемое.
- (4 \Rightarrow 3) Зафиксируем последовательность $\{x_n\}_{n=1}^\infty$. Если множество её значений конечно, то в ней можно выделить стационарную подпоследовательность. Если же множество её значений бесконечно, то оно имеет предельную точку $x_0 \in X$, поэтому можно выбрать подпоследовательность $\{x_{n_k}\}$ такую, что $x_{n_k} \rightarrow_X x_0$

□

3.3 Теорема Арцела-Асколи

Определение 3.6. Обозначим за $C(X, Y)$ множество непрерывных функций $f : X \rightarrow Y$.

Теорема 3.3. Теорема Кантора.

Пусть X – компактное метрическое пространство, и функция $f \in C(X, \mathbb{R})$. Тогда f равномерно непрерывна на X .

Доказательство. Предположим противное, то есть выполнено следующее:

$$\exists \varepsilon_0 > 0 \forall \delta > 0 \exists x, y \in X, \rho(x, y) < \delta : |f(x) - f(y)| \geq \varepsilon_0$$

Выбирая $\delta := \frac{1}{n}$ для каждого $n \in \mathbb{N}$, получим последовательности $\{x_n\}, \{y_n\}$. Поскольку X компактно, можно выделить из них сходящиеся подпоследовательности $\{x_{n_k}\}, \{y_{n_k}\}$, причём сходятся они к одной и той же точке $x_0 \in X$ по построению. Однако для любого $k \in \mathbb{N}$ выполнено $|f(x_{n_k}) - f(y_{n_k})| \geq \varepsilon_0$ – противоречие. \square

Теорема 3.4. Арцела-Асколи.

Пусть X – компактное метрическое пространство, $M \subset C(X, \mathbb{R})$. Тогда множество M вполне ограничено \Leftrightarrow множество M ограничено и выполнено условие равностепенной непрерывности:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall x, y \in X, \rho(x, y) < \delta : \forall f \in M : |f(x) - f(y)| < \varepsilon$$

Доказательство. (\Rightarrow) Мы уже доказывали, что из вполне ограниченности следует обычная ограниченность, проверим условие равностепенной непрерывности. Зафиксируем произвольное $\varepsilon > 0$ и выберем конечным набор функций $\varphi_1, \dots, \varphi_n \in C(X, \mathbb{R})$, образующий ε -сеть.

По теореме Кантора, каждая из этих функций равномерно непрерывна. Пусть $\delta_1, \dots, \delta_n > 0$ – числа, соответствующие выбранному ε в определении равномерной непрерывности:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_k > 0 \forall x, y \rho(x, y) < \delta_k : |\varphi_k(x) - \varphi_k(y)| < \varepsilon$$

Тогда для $\delta := \min\{\delta_1, \dots, \delta_n\}$ выполнено требуемое:

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - \varphi_k(x)| + |\varphi_k(x) - \varphi_k(y)| + |\varphi_k(y) - f(y)| < 3\varepsilon$$

(\Leftarrow) Поскольку множество M ограничено, то существует $C > 0$ такое, что

$$\forall f \in M : \|f\| = \sup_{x \in [a, b]} |f(x)| \leq C$$

Зафиксируем произвольное $\varepsilon > 0$ и выберем по нему $\delta > 0$ из условия равностепенной непрерывности.

Разобьём отрезок $[a, b]$ на части длины меньше δ точками

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$$

, а отрезок $[-C, C]$ – на части длины меньше ε точками

$$-C = y_0 < y_1 < \dots < y_m = C$$

и рассмотрим конечное множество L кусочно линейных функций, построенных по всевозможным наборам точек вида

$$\{(x_j, y_{i_k})\}_{j=0}^n, i_k \in \overline{0, m}$$

Из такого построению становится очевидно, что

$$\forall f \in M \exists \varphi \in L \forall i \in \{0, \dots, n\} : |f(x_i) - \varphi(x_i)| < \varepsilon$$

Рассмотрим произвольную точку $x \in [a, b]$ и выберем $i \in \{0, \dots, n-1\}$ такое, что $x \in [x_i, x_{i+1}]$, тогда:

$$|f(x) - \varphi(x)| \leq |f(x) - f(x_i)| + |f(x_i) - \varphi(x_i)| + |\varphi(x) - \varphi(x_i)| < 2\varepsilon + |\varphi(x_{i+1}) - \varphi(x_i)|$$

Первое слагаемое меньше ε из равностепенной непрерывности, а второе по построению φ . Оценим слагаемое $|\varphi(x_{i+1}) - \varphi(x_i)|$ отдельно:

$$|\varphi(x_{i+1}) - \varphi(x_i)| \leq |f(x_{i+1}) - \varphi(x_{i+1})| + |f(x_{i+1}) - f(x_i)| + |f(x_i) - \varphi(x_i)| < 3\varepsilon$$

Таким образом, $\sup_{x \in [a, b]} |f(x) - \varphi(x)| < 5\varepsilon$. Значит, построенное множество L образует конечную 5ε -сеть для множества M , тогда, в силу произвольности выбора числа ε , множество M вполне ограничено. \square

4 Линейные нормированные пространства

4.1 Теорема Рисса

Определение 4.1. Линейным нормированным пространством над полем \mathbb{K} , где $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ или $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, называется линейное пространство E над \mathbb{K} с функцией $\|\cdot\| : E \rightarrow \mathbb{R}$, обладающей следующими свойствами:

1. $\forall x \in E : \|x\| \geq 0$, причём $\|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0$
2. $\forall x \in E \forall \alpha \in \mathbb{K} : \|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$
3. $\forall x, y \in E : \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (неравенство треугольника)

Функция $\|\cdot\|$ называется нормой на пространстве E .

Лемма 4.1. Норма непрерывна, как функция $E \rightarrow \mathbb{R}_+$

Доказательство.

$$\forall \{x_n\}_{n=1}^{\infty} : x_n \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \Rightarrow \rho(x_n, x) = \|x_n - x\| \rightarrow 0$$

Дважды воспользуемся неравенством треугольника:

- $\|x_n\| \leq \|x_n - x\| + \|x\|$
- $\|x\| \leq \|x_n - x\| + \|x_n\|$

Таким образом, $|\|x_n\| - \|x\|| \rightarrow 0$, то есть $\|x_n\| \rightarrow \|x\|$, что и требовалось. \square

Определение 4.2. Пусть E – линейное нормированное пространство. Множество $L \subset E$ называется:

- Линейным многообразием в E , если L замкнуто относительно сложения и умножения на скаляры из \mathbb{K} .

- Подпространством в E , если L является линейным многообразием в E и при этом замкнуто.

Лемма 4.2. *О почти перпендикуляре.*

Пусть E – линейное нормированное пространство, $L \subsetneq E$ – подпространство. Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists y \in E \|y\| = 1 : \rho(y, L) := \inf_{z \in L} \|y - z\| \geq 1 - \varepsilon$$

Доказательство. Зафиксируем $y_0 \in E \setminus L$ и положим $d := \rho(y_0, L) > 0$. Выберем вектор $z_0 \in L$ такой, что $d \leq \|y_0 - z_0\| \leq d(1 + \varepsilon)$ и покажем, что подходит вектор $y := \frac{y_0 - z_0}{\|y_0 - z_0\|} := \alpha(y_0 - z_0)$. Действительно, $\|y\| = 1$, и для любого $z \in L$ выполнены неравенства:

$$\|y - z\| = \|\alpha(y_0 - z_0) - z\| = |\alpha| \|y_0 - \left(z_0 + \frac{1}{\alpha} z\right)\| \geq |\alpha| d \geq \frac{d}{d(1 + \varepsilon)} \geq 1 - \varepsilon$$

Для осмысления последних переходов вникните в следующее утверждение:

$$\|y_0 - z_0\| \leq d(1 + \varepsilon) \Rightarrow \alpha = \frac{1}{\|y_0 - z_0\|} \geq \frac{1}{d(1 + \varepsilon)}$$

А также не забывайте про разложение Тейлора:

$$\frac{1}{1 + x} \geq 1 - x$$

□

Определение 4.3. Пусть E – линейное нормированное пространство, $M \subset E$. Линейной оболочкой множества M называется множество следующего вида:

$$\langle M \rangle := \left\{ \sum_{k=1}^n \alpha_k m_k \mid \{\alpha_k\}_{k=1}^n \subset \mathbb{K}, \{m_k\}_{k=1}^n \subset M \right\}$$

Теорема 4.1. *Рисса.*

Пусть E – линейное нормированное пространство. Тогда единичная сфера $S(0, 1)$ компактна в $E \Leftrightarrow \dim E < +\infty$

Доказательство. (\Leftarrow) По эквивалентности норм конечномерных пространствах (теорема будет далее), все нормы на конечномерном линейном пространстве эквивалентны, а относительно евклидовой нормы сфера $S(0, 1)$ компактна.

(\Rightarrow) От противного. Зафиксируем $\varepsilon > 0$ и построим последовательность $\{x_n\} \subset S(0, 1)$ с попарными расстояниями не меньше $1 - \varepsilon$, из чего будет следовать, что сфера $S(0, 1)$ не вполне ограничена и потому не компактна:

- Выберем $x_1 \in S(0, 1)$ произвольным образом
- По предыдущей лемме выберем $x_2 \in S(0, 1) \setminus \langle x_1 \rangle$ такое, что $\rho(x_2, \langle x_1 \rangle) \geq 1 - \varepsilon$, причём утверждение применимо, так как линейная оболочка конечномерна, а линейная оболочка конечного числа элементов к тому же замкнута, а значит это действительно подпространство.
- ...

Поскольку $\dim E = +\infty$, то процесс не закончится, и будет получена искомая последовательность $\{x_n\}$. □

4.2 Характеристическое свойство евклидовых пространств...

Определение 4.4. Евклидовым пространством над полем \mathbb{K} , где $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ или $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, называется линейное пространство E над \mathbb{K} с функцией $(\cdot, \cdot) : E^2 \rightarrow \mathbb{K}$, обладающее следующими свойствами:

1. $\forall x \in E : (x, x) \geq 0$, причём $(x, x) = 0 \Leftrightarrow x = 0$
2. $\forall x, y \in E : (x, y) = \overline{(y, x)}$
3. $\forall x, y, z \in E : \forall \alpha, \beta \in \mathbb{K} : (\alpha x + \beta y, z) = \alpha(x, z) + \beta(y, z)$

Определение 4.5. Полное линейное нормированное пространство E называется банаховым.

Определение 4.6. Полное евклидово пространство H называется гильбертовым.

Теорема 4.2. Характеристическое свойство Евклидовых пространств.

Пусть E – линейное нормированное пространство. Тогда норма в E порождается скалярным произведением \Leftrightarrow

$$\forall x, y \in E : \|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2\|x\|^2 + 2\|y\|^2$$

Доказательство. (\Rightarrow) Распишем квадраты норм, как скалярные произведения элементов самих на себя:

$$\begin{aligned} \langle x + y, x + y \rangle + \langle x - y, x - y \rangle &= \langle x, x \rangle + 2\langle x, y \rangle + \langle y, y \rangle + \langle x, x \rangle - 2\langle x, y \rangle + \langle y, y \rangle = \\ &= 2\|x\|^2 + 2\|y\|^2 \end{aligned}$$

(\Leftarrow) Без доказательства, очень-очень сложно □

4.3 Эквивалентность норм в конечномерном пространстве...

Определение 4.7. Две нормы $p, q : V \rightarrow \mathbb{R}_+$ над пространством V называются эквивалентными, если

$$\exists C_1, C_2 > 0 \forall x \in V : C_1 p(x) \leq q(x) \leq C_2 p(x)$$

Лемма 4.3. Пусть E – линейное нормированное пространство, и $\dim E < +\infty$. Тогда любые две нормы на E эквивалентны.

Доказательство. (Доказательство для $\mathbb{K} = \mathbb{R}$)

Поскольку E конечномерно, то в нём можно выбрать максимальную по включению линейно независимую систему $e = \{e_1, \dots, e_n\} \subset E$, тогда e будет являться базисом в E . Для произвольного элемента $x \in E$, имеющего в базисе e координатный столбец $\alpha \in \mathbb{R}^n$, зададим его евклидову норму следующим образом:

$$\|x\|_e = \sqrt{\sum_{k=1}^n \alpha_k^2}$$

Зафиксируем произвольную норму $\|\cdot\|$ и докажем, что она эквивалентна норме $\|\cdot\|_e$:

1. Покажем, что $\|\cdot\| < C\|\cdot\|_e$ для некоторого $C > 0$. Для произвольного $x \in E$, имеющего в базисе e координатный столбец $\alpha \in \mathbb{R}^n$, выполнено следующее:

$$\|x\| = \left\| \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k \right\| \leq \max_{1 \leq k \leq n} \|e_k\| \left(\sum_{k=1}^n |\alpha_k| \right)$$

Поскольку для любого $k \in \{1, \dots, n\}$ выполнено $\alpha_k < \|x\|_e$, то достаточно взять число $C := n \cdot \max_{1 \leq k \leq n} \|e_k\|$

2. Покажем теперь, что $\|\cdot\|_e < \tilde{C}\|\cdot\|$ для некоторого $\tilde{C} > 0$. Предположим противное, тогда

$$\forall n \in \mathbb{N} \exists x_n \in E : \|x_n\|_e > n\|x_n\|$$

Можно без ограничения общности считать, что $\|x_n\|_e = 1$ для любого $n \in \mathbb{N} \Rightarrow \|x_n\| < \frac{1}{n}$

Поскольку последовательность $\{x_n\}$ содержится в единичной сфере $S_e(0, 1)$ и относительно евклидовой нормы сфера компактна, можно выделить из $\{x_n\}$ подпоследовательность $\{x_{n_k}\}$, сходящуюся относительно евклидовой нормы. Тогда

$$\exists x \in S_e(0, 1) : \|x_{n_k} - x\|_e \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

Тогда в силу предыдущего пункта $\|x_{n_k} - x\| \rightarrow 0$. Но по построению $\|x_{n_k}\| < \frac{1}{n_k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$, поэтому $x = 0$ – противоречие с тем, что $x \in S_e(0, 1)$.

□

Следствие. Пусть E – линейное нормированное пространство $x_1, \dots, x_n \in E$. Тогда линейная оболочка $L := \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ образует подпространство в E .

Доказательство. Заметим, что $\dim L < +\infty$, и по предыдущему утверждению сужение нормы из E на L эквивалентно евклидовой норме. Относительно евклидовой нормы конечномерное пространство полно, поэтому и L полно относительно нормы из E . Следовательно, L замкнуто, как подмножество в E . □

Определение 4.8. Линейным топологическим пространством называется топологическое пространство X с определёнными на нём операциями сложения и умножения на числа из поля \mathbb{K} , непрерывными на X .

Пример. Любое линейное нормированное пространство E является линейным топологическим.

4.4 Теорема Рисса о проекции

Определение 4.9. Пусть E – линейное нормированное пространство, $L \subset E$ – линейное нормированное подпространство, $h \in E$. Элементом наилучшего приближения для h называется $x \in L$ такой, что $\|h - x\| = \rho(h, L) = \inf_{y \in L} \|h - y\|$

Лемма 4.4. Пусть H – гильбертово пространство, $M \subset H$ – подпространство в H . Тогда для любого $h \in H$ существует единственный элемент наилучшего приближения $x \in M$.

Доказательство. Зафиксируем $h \in H$. Сначала докажем, что элемент наилучшего приближения для h существует.

Положим $d := \rho(h, M)$. Если $d = 0$, то, в силу замкнутости множества M , выполнено $h \in M$, и в качестве элемента наилучшего приближения для h подходит сам h . Иначе выберем $\{x_n\} \subset M$ такую, что $\|h - x_n\| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} d$. По равенству параллелограмма,

$$\forall n, m \in \mathbb{N}: \|x_n - x_m\|^2 = 2\|h - x_n\|^2 + 2\|h - x_m\|^2 - 4\left\|h - \frac{x_n + x_m}{2}\right\|^2$$

Поскольку $\|h - x_n\|^2 \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} d^2$, $\|h - x_m\|^2 \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} d^2$ и выполнено неравенство $\|h - \frac{x_n + x_m}{2}\| \geq d^2$, последовательность $\{x_n\}$ фундаментальна. Поскольку пространство H полно, а M замкнуто, то существует $x \in M$ такой, что $x_n \rightarrow_H x$, причём, в силу непрерывности нормы (4.1), $\|h - x\| = d$

Покажем теперь, что элемент наилучшего приближения для h единственен. Пусть для некоторого $y \in M$ тоже выполнено равенство $\|h - y\| = d$, тогда, по равенству параллелограмма, выполнено следующее:

$$4d^2 = 2\|h - x\|^2 + 2\|h - y\|^2 = \|x - y\|^2 + 4\left\|h - \frac{x + y}{2}\right\|^2 \geq \|x - y\|^2 + 4d^2$$

Для данной цепочки мы воспользовались следующими равенствами:

$$h - x + h - y = 2h - x - y = 2\left(h - \frac{x + y}{2}\right); \quad h - x - h + y = -(x - y)$$

Итак, $\|x - y\| = 0 \Rightarrow x = y$, что и требовалось. \square

Определение 4.10. Пусть E – евклидово пространство, $S \subset E$. Аннулятором множества S называется следующее множество:

$$H^\perp := \{y \in E \mid \forall x \in S: (x, y) = 0\}$$

Замечание. Легко проверить, что S^\perp является подпространством в E . Кроме того, выполнены равенства

$$S^\perp = \langle S \rangle^\perp = \overline{\langle S \rangle}^\perp$$

Теорема 4.3. Рисса, о проекции.

Пусть H – гильбертово пространство, $M \subset H$ – подпространство в H . Тогда $H = M \oplus M^\perp$.

Доказательство. Покажем сначала, что $H = M + M^\perp$ (разложение существует, но м.б. не единственно).

Зафиксируем $h \in H$, и по утверждению о наилучшем приближении, выберем $x \in M$. Положим $y := h - x$ и $d := \|y\|$, тогда для произвольного $m \in M$ и произвольного $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ выполнено следующее:

$$d^2 = \|h - x\|^2 \leq \|h - (x + \alpha m)\|^2 = d^2 - 2\alpha(h - x, m) + \alpha^2\|m\|^2 \Rightarrow (y, m) \leq \frac{\alpha}{2}\|m\|^2$$

В силу произвольности α получаем, что $(y, m) = 0 \Rightarrow y \in M^\perp$, причём $h = x + y$. Значит, выполнено равенство $H = M + M^\perp$.

Проверим теперь, что рассматриваемая сумма действительно прямая. Если $z \in M \cap M^\perp \Rightarrow (z, z) = 0 \Rightarrow z = 0$, что и означает требуемое. \square

4.5 Сепарабельные гильбертовы пространства

Определение 4.11. Пусть E – линейное нормированное пространство. Система $\{e_n\} \subset E$ называется базисом Шаудера в E , если

$$\forall x \in E \exists! \{\alpha_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathbb{K} : x = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n e_n$$

Лемма 4.5. *Неравенство Бесселя.*

Пусть E – евклидово пространство, элементы $\{e_i\} \subset E$ образуют ортонормированную систему. Тогда для любого $x \in E$ выполнено следующее неравенство:

$$\sum_{k=1}^{\infty} |(x, e_k)|^2 \leq \|x\|^2$$

Доказательство. Достаточно заметить, что в силу ортонормированности системы $\{e_k\}$ выполнено следующее равенство:

$$0 \leq \left\| x - \sum_{k=1}^n (x, e_k) e_k \right\|^2 = \|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |(x, e_k)|^2$$

Поскольку левая часть равенства неотрицательна, то неотрицательна и правая часть, и верно это даже после предельного перехода $n \rightarrow +\infty$. \square

Лемма 4.6. Пусть E – евклидово пространство, элементы $e_1, \dots, e_k \in E$ образуют ортонормированную систему. Тогда

$$\forall x \in E \forall \{\alpha_k\}_{k=1}^n \subset \mathbb{K} : \left\| x - \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k \right\| \geq \left\| x - \sum_{k=1}^n (x, e_k) e_k \right\|$$

Более того, равенство в неравенстве выше достигается тогда и только тогда, когда

$$\forall k \in \overline{1, n} : \alpha_k = (x, e_k)$$

Доказательство. В силу ортонормированности системы $\{e_k\}_{k=1}^n$, выполнены следующие равенства:

$$\begin{aligned} \left\| x - \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k \right\|^2 &= \left(x - \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k, x - \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k \right) = \\ &= \|x\|^2 - 2 \sum_{k=1}^n \alpha_k (x, e_k) + \sum_{k=1}^n \alpha_k^2 = \left\| x - \sum_{k=1}^n (x, e_k) e_k \right\|^2 + \sum_{k=1}^n ((x, e_k) - \alpha_k)^2 \end{aligned}$$

\square

Теорема 4.4. Пусть H – сепарабельное гильбертово пространство, $\dim H = +\infty$ и $e = \{e_n\}$ – ортонормированная система. Тогда следующие условия эквивалентны:

1. e – ортонормированный базис в H

2. $\overline{\langle e \rangle} = H$, то есть e – полная система.

3. Для любого $h \in H$ выполнено равенство Парсеваля:

$$\|h\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(h, e_n)|^2$$

4. $e^\perp = \{0\}$

Доказательство. • (1 \Rightarrow 2) Очевидно из определения базиса.

- (2 \Rightarrow 1) Зафиксируем произвольный $h \in H$ и произвольное $\varepsilon > 0$. По условию, существует конечный набор $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ такой, что $\|h - \sum_{k=1}^n \alpha_k e_k\| < \varepsilon$. Тогда, по предыдущей лемме, выполнено также неравенство $\|h - \sum_{k=1}^n (h, e_k) e_k\| < \varepsilon$. Тогда, в силу произвольности числа ε , выполнено равенство $h = \sum_{n=1}^{\infty} (h, e_n) e_n$.

Проверим теперь, что разложение элемента h единственно. Пусть для некоторого набора $\{\beta_n\} \subset \mathbb{K}$ выполнено равенство $h = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n$. Тогда для любого $k \in \mathbb{N}$, скалярно умножая частичную сумму ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n e_n$ на e_k и переходя к пределу, получаем, что $\beta_k = (h, e_k)$, что и означает требуемое.

- (1 \Leftrightarrow 3) Уже было замечено, что для любого $h \in H$ и любого $k \in \mathbb{N}$ выполнено следующее:

$$\left\| h - \sum_{k=1}^n (h, e_k) e_k \right\|^2 = \|h\|^2 - \sum_{k=1}^n |(h, e_k)|^2$$

Значит, $h = \sum_{n=1}^{\infty} (h, e_n) e_n \Leftrightarrow \|h\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} |(h, e_n)|^2$, и единственность разложения элемента h доказывается так же, как и в импликации выше.

- (2 \Leftrightarrow 4) Из теоремы Рисса и равенства $e^\perp = \overline{\langle e \rangle}^\perp = H^\perp$ получаем требуемое. □

5 Линейные ограниченные операторы в линейных нормированных пространствах

5.1 Связь непрерывности и ограниченности линейного оператора

Определение 5.1. Пусть E_1, E_2 – линейные нормированные пространства над полем \mathbb{R} (\mathbb{R} или \mathbb{C}). Тогда $A : E_1 \rightarrow E_2$ будем называть оператором, а $f : E \rightarrow \mathbb{K}$ – функционалом.

Определение 5.2. Оператор A называется ограниченным, если для любого ограниченного $M \subset E_1$ образ $A(M)$ ограничен в E_2 .

Определение 5.3. Для линейных операторов можно ввести следующие определения:

- Образ оператора:

$$\text{Im } A = \{y \in E_2 \mid \exists x \in E_1 : Ax = y\}$$

- Ядро оператора:

$$\ker A = \{x \in E_1 \mid Ax = 0\}$$

Определение 5.4. Линейный оператор A называется непрерывным, если для любой последовательности $x_n \rightarrow x$ выполнено $Ax_n \rightarrow Ax$.

Теорема 5.1. Пусть E_1, E_2 – линейные нормированные пространства. $A : E_1 \rightarrow E_2$ – линейный оператор. Тогда A – ограниченный тогда и только тогда, когда A – непрерывный.

Доказательство. (\Rightarrow) Как мы знаем, $x_n \rightarrow x \Leftrightarrow \|x_n - x\| \rightarrow 0$. Тогда

$$\|Ax_n - Ax\|_{E_2} = \|A(x_n - x)\|_{E_2} \leq \|A\| \cdot \|x_n - x\|_{E_1} \rightarrow 0$$

(\Leftarrow) Предположим противное, то есть A не является ограниченным:

$$\forall K \exists x : \|Ax\|_{E_2} > K\|x\|_{E_1}$$

Пусть K пробегает все натуральные числа, тогда образуется последовательность $\{x_n\}$ такая, что $\|Ax_n\|_{E_2} > n\|x_n\|_{E_1}$. Все x_n , очевидно, ненулевые. Рассмотрим последовательность $y_n = \frac{1}{n} \frac{x_n}{\|x_n\|_{E_1}} \rightarrow 0$.

$$\forall n \in \mathbb{N} : \|Ay_n\|_{E_2} = \frac{\|Ax_n\|_{E_2}}{n\|x_n\|_{E_1}} > 1$$

Но из-за непрерывности оператора $Ay_n \rightarrow A0 = 0$. Противоречие. \square

5.2 Топологии и сходимости в пространстве операторов...

Лемма 5.1. Если A – линейный оператор, то следующие условия эквивалентны:

1. A – ограниченный
2. $\exists K : \|Ax\|_{E_2} \leq K\|x\|_{E_1}$
3. Образ единичного шара под действием оператора A ограничен

Доказательство. $(1 \Rightarrow 2)$ Если A – ограниченный, то образ любого ограниченного множества ограничен. В частности, образ единичного шара B ограничен. То есть

$$\exists L \forall x \neq 0 : \left\| A \left(\frac{x}{\|x\|_{E_1}} \right) \right\|_{E_2} \leq K$$

В силу линейности оператора:

$$\exists K \forall x \neq 0 : \|Ax\|_{E_2} \leq K\|x\|_{E_1}$$

$(2 \Rightarrow 3)$ Если

$$\exists K : \|Ax\|_{E_2} \leq K\|x\|_{E_1}$$

, то $\forall x : \|x\|_{E_1} = 1$ получаем, что $\|Ax\|_{E_2} \leq K$. То есть образ единичного шара ограничен.

$(3 \Rightarrow 1)$

$$\exists K \forall x, \|x\|_{E_1} = 1 : \|Ax\|_{E_2} \leq K$$

Пусть $M \subset E_1$ ограничено, то есть лежит в шаре радиуса R . Далее считаем, что $x \neq 0$:

$$\forall x \in M : \left\| A \left(\frac{x}{\|x\|_{E_1}} \right) \right\| \leq K \Rightarrow \forall x \in M : \|Ax\|_{E_2} \leq K\|x\|_{E_1} \leq K \cdot R$$

\square

Определение 5.5. Нормой линейного ограниченного оператора A называется

$$\|A\| = \inf\{K \mid \forall x : \|Ax\|_{E_2} \leq K\|x\|_{E_1}\}$$

Определение 5.6. $\mathcal{L}(E_1, E_2)$ – пространство линейных ограниченных операторов, действующих из E_1 в E_2 . Оно образует линейное пространство над \mathbb{K} .

Определение 5.7. Двойственное или сопряжённое пространство – это

$$E^* = \mathcal{L}(E, \mathbb{K})$$

где $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ или \mathbb{C} , E – линейное нормированное пространство.

Теорема 5.2. Пусть E_1, E_2 – линейные нормированные пространства. Тогда

1. $\mathcal{L}(E_1, E_2)$ – линейное нормированное пространство с нормой $\|A\|$.
2. Если E_2 – банахово, то $\mathcal{L}(E_1, E_2)$ – банахово.

Доказательство. 1. Линейность данного пространства очевидна. Проверим неравенство треугольника для нормы:

$$\|A_1 + A_2\| = \sup_{\|x\|=1} \|(A_1 + A_2)x\| \leq \sup_{\|x\|=1} \|A_1x\| + \|A_2x\| \leq \sup_{\|x\|=1} \|A_1x\| + \sup_{\|x\|=1} \|A_2x\| = \|A_1\| + \|A_2\|$$

2. Покажем, что $\mathcal{L}(E_1, E_2)$ – полное, если E_2 – полное.

Пусть $\{A_n\} \subset \mathcal{L}$ – фундаментальна, то есть

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \forall n, m \geq N : \|A_n - A_m\| < \varepsilon$$

Заметим, что

$$\forall x \in S_{E_1}(0, 1) \|A_nx - A_mx\| = \|(A_n - A_m)x\| \leq \|A_n - A_m\| \|x\|_{E_1} < \varepsilon$$

Получается, что $\forall x \in S_{E_1}(0, 1)$ последовательность $\{A_nx\}$ фундаментальна. Так как E_2 – полное, то эта последовательность сходится. Обозначим её предел через Ax . A , очевидно, линейный оператор. Покажем, что он ограничен.

Так как $\|\cdot\|$ – непрерывная функция, то $\|A_nx\|_{E_2} \rightarrow \|Ax\|_{E_2}$. Воспользуемся тем, что $\{A_n\}$ ограничена (из-за фундаментальности), то есть

$$\exists K \forall n : \|A_n\| \leq K \Rightarrow \|A_nx\|_{E_2} \leq \|A_n\| \|x\|_{E_1} \leq K \|x\|_{E_1}$$

Переходя к пределу в этом неравенстве, получаем, что $\|Ax\| \leq K \|x\|_{E_1}$. Таким образом, A является ограниченным линейным оператором и лежит в $\mathcal{L}(E_1, E_2)$. Осталось показать, что $A_n \rightarrow A$.

Вспомним фундаментальность:

$$\forall x \in S_{E_1}(0, 1) : \|A_nx - A_mx\|_{E_2} < \varepsilon$$

Зафиксируем номер n и устремим m к бесконечности. Тогда

$$\forall x \in S_{E_1}(0, 1) : \|A_nx - Ax\| \leq \varepsilon$$

A значит

$$\sup_{\|x\|=1} \|A_nx - Ax\| \leq \varepsilon$$

Это и означает, что $\|A_n - A\| \rightarrow 0$, то есть $A_n \rightarrow A$.

□

Следствие. Если E – линейное нормированное пространство, то E^* всегда полное.

5.3 Задача о продолжении непрерывного отображения

Теорема 5.3. Пусть E_1 – линейное нормированное пространство, E_2 – банахово пространство и A – линейный ограниченный оператор: $A : D(A) \rightarrow E_2$, где $D(A)$ – линейное многообразие в $E_1 = \overline{D(A)}$. Тогда $\exists! \tilde{A} \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$:

1. $\tilde{A}|_{D(A)} = A$
2. $\|\tilde{A}\| = \|A\|$

Доказательство. Единственность.

Пусть есть \tilde{A}^1, \tilde{A}^2 . Из замкнутости E_1 :

$$\forall x \in E_1 \exists \{x_n\} \subset D(A) : x_n \rightarrow x$$

При этом, $\tilde{A}^1 x = \lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n = \tilde{A}^2 x$. Значит, $\tilde{A}^1 = \tilde{A}^2$.

Существование.

Определим оператор \tilde{A} по формуле $\tilde{A}x = \lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n$. Для корректности необходимо показать:

- Предел $\lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n$ существует
- Предел не зависит от выбора $\{x_n\}$
- Действительно $\tilde{A}|_{D(A)} = A$

Покажем:

- Так как $\{x_n\}$ сходится, она фундаментальна, значит последовательность $\{A x_n\} \subset E_2$ фундаментальна. Пространство E_2 банахово, поэтому предел $\lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n$ существует.
- Пусть есть две последовательности $\{x'_n\}, \{x''_n\}$, сходящиеся к одному и тому же $x \in E_1$, но пусть пределы $\lim_{n \rightarrow +\infty} A x'_n, \lim_{n \rightarrow +\infty} A x''_n$ разные. Тогда возьмём последовательность $\{y_n\}$, полученную чередованием элементов $\{x'_n\}, \{x''_n\}$. Но получим, что $\{A y_n\}$ расходится. Противоречие предыдущему пункту.
- Возьмём константную последовательность $\{x\}_{n=1}^\infty, x \in D(A)$. Очевидно, что $\lim_{n \rightarrow +\infty} A x = A x$. По предыдущему пункту $\lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n$ не зависит от выбора последовательности, значит $\tilde{A}|_{D(A)} = A$.

Осталось показать, что \tilde{A} – линейный ограниченный оператор. Линейность очевидна из линейности A и предела.

Ограниченность (а значит и непрерывность) очевидна из непрерывности нормы:

$$\tilde{A}x = \lim_{n \rightarrow +\infty} A x_n \Leftrightarrow \|A x_n\| \rightarrow \|\tilde{A}x\|$$

□

5.4 Теорема Банаха-Штейнгауза

Теорема 5.4. *Теорема Банаха-Штейнгауза.*

Пусть X, Y – линейные нормированные пространства, причём X полно. Пусть $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{L}(X, Y)$ – семейство линейных непрерывных операторов. Тогда

$$\forall x \in X : \sup\{\|Ax\|_Y \mid A \in \mathcal{A}\} < +\infty \Rightarrow \sup\{\|A\| \mid A \in \mathcal{A}\} < +\infty$$

То есть, из поточечной ограниченности следует равномерная ограниченность.

Доказательство. Пусть

$$X_n = \{x \in X \mid \sup_{A \in \mathcal{A}} \|Ax\|_Y \leq n\} = \bigcap_{A \in \mathcal{A}} \{x \in X \mid \|Ax\|_Y \leq n\}$$

Для любого $A \in \mathcal{A}$ множество $\{x \in X \mid \|Ax\|_Y \leq n\}$ замкнуто, как прообраз замкнутого шара $\overline{B}_n(0) \subset Y$ под действием непрерывного отображения A , а пересечение любого количества замкнутых множеств замкнуто.

Так как $\bigcup_{n=1}^{\infty} X_n = X$, то по теореме Бэра (X полное, а значит все X_n не могут быть не плотными ни в одном шаре, а значит найдётся m и какой-то шар, в котором X_m плотно):

$$\exists m \exists \overline{B}_\varepsilon(x_0) : \overline{B}_\varepsilon(x_0) \subseteq X_m$$

Пусть $u \in X, \|u\|_X = 1$. Тогда рассмотрим $A \in \mathcal{A}$:

$$\begin{aligned} \|Au\|_Y &= \frac{1}{\varepsilon} \|A[\varepsilon u] + Ax_0 - Ax_0\|_Y = \frac{1}{\varepsilon} \|A[x_0 + \varepsilon u] - Ax_0\|_Y \leq \\ &\frac{1}{\varepsilon} (\|A[x_0 + \varepsilon u]\| + \|Ax_0\|_Y) \leq \frac{1}{\varepsilon} \leq \frac{1}{\varepsilon} (m + m) \end{aligned}$$

Последнее неравенство верно из-за того, что $x_0 \in X_m, x_0 + \varepsilon u \in \overline{B}_\varepsilon(x_0) \subset X_m$. В неравенстве сверху можно перейти к супремуму по u и получить, что

$$\forall A \in \mathcal{A} : \|A\| \leq \frac{2m}{\varepsilon} < +\infty$$

□

5.5 Полнота пространства...

Теорема 5.5. *Полнота $\mathcal{L}(E_1, E_2)$ относительно поточечной сходимости.*

Пусть E_1, E_2 – банаховы пространства, $\{A_n\} \subset \mathcal{L}(E_1, E_2)$, причём $\forall x \in E_1 : \{A_n x\}$ – фундаментальная в E_2 . Тогда

$$\exists A \in \mathcal{L}(E_1, E_2) \forall x \in E_1 : \lim_{n \rightarrow +\infty} A_n x = Ax$$

Доказательство. Так как $\{A_n x\}$ фундаментальна в банаховом E_2 , то $\exists \lim_{n \rightarrow +\infty} A_n x, Ax := \lim_{n \rightarrow +\infty} A_n x$.

Осталось показать, что определённый таким образом оператор – линейный непрерывный. Линейность очевидна из линейности предела и каждого A_n .

Так как $\forall x \in E_1 : \{A_n x\}$ фундаментальна, то $\{A_n\}$ поточечно ограничена и по теореме Банаха-Штейнгауза ограничена равномерно:

$$\exists M \forall n \in \mathbb{N} : \|A_n\| \leq M$$

Тогда

$$\|A_n x\| \leq \|A_n\| \cdot \|x\| \leq M \|x\|, \|A_n x\| \rightarrow \|Ax\| \Rightarrow \|Ax\| \leq M \|x\|$$

То есть оператор ограничен и непрерывен, а значит $A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$. \square

Теорема 5.6. *Критерий поточечной сходимости операторов из $\mathcal{L}(E_1, E_2)$.*

Пусть E_1 – банахово, E_2 – линейное нормированное пространство. Верно, что $\forall \{A_n\} \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$, $A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$:

$$A_n \xrightarrow{\text{поточечно}} A \Leftrightarrow \begin{cases} \exists M \forall n : \|A_n\| \leq M \\ \forall s \in S, E_1 =: \overline{\langle S \rangle} : A_n s \rightarrow A s \end{cases}$$

Доказательство. (\Rightarrow) Пункт 2 очевиден. Из поточечной сходимости $\{A_n x\}$ следует поточечная ограниченность $\{A_n x\}$. Значит, по теореме Банаха-Штейнгауза последовательность $\{\|A_n\|\}$ ограничена.

(\Leftarrow) Так как множество $\langle S \rangle$ всюду плотно в E_1 :

$$\forall \varepsilon > 0 \forall x \in E_1 \exists y \in \langle S \rangle : \|x - y\| < \varepsilon$$

Тогда для y (благодаря п.2) верно:

$$\exists N(\varepsilon, y) \forall n > N : \|A_n y - A y\| < \varepsilon$$

Перейдём к $x \in E_1$:

$$\|A_n x - A x\| \leq \|A x - A y\| + \|A_n y - A y\| + \|A_n y - A_n x\| \leq \varepsilon \|A\| + \varepsilon + \varepsilon \|A_n\| \leq \varepsilon (\|A\| + M + 1)$$

Значит A_n поточечно сходится к A на E_1 . \square