Содержание

Функциональный анализ 2.0.

Disclaymer: доверять этому конспекту или нет выбирайте сами
Big thanks for клуб Теха Лекций и Максимову Даниилу в частности.

1. Слабая сходимость в банаховом пространстве

1.1. Изометричность вложения E в E^{**}. Критерий слабой сходимости последовательности.

Теорема 1.1.1 (Хана Банаха, напоминание): Пусть E – ЛНП. $M \subset E$ – линейное многообразие, f – линейный ограниченный функционал на M. Тогда $\exists \tilde{f} \in E^*$:
1. $\tilde{f}|_M = f$
2. $\left\|\tilde{f}\right\| = \|f\|$

Следствие 1.1.1.1:

$$\forall x \in E : \|x\| = \sup_{f \in E^*, \|f\|_{E^*}=1} |f(x)|$$

Теорема 1.1.2 (Об изометрии): E изометрично E^{**}, через отображение $\pi : E \to E^{**}$, где

$$\pi x = F_x \in E^{**}; \quad F_x(f) = f(x)$$

Доказательство: Нужно доказать, что отображение π не меняет норму.

В силу приведённого выше следствия из теоремы Хана-Банаха:

$$\|F_x\| = \sup_{\|f\|=1} |F_x(f)| = \sup_{\|f\|=1} |f(x)| = \|x\|$$

□

Определение 1.1.1: Пусть E – нормированное пространство. Говорим, что последовательность элементов $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ **слабо сходится** к x:

$$x_n \xrightarrow{w} x \Leftrightarrow \forall f \in E^* : f(x_n) \to f(x)$$

Теорема 1.1.3 (Критерий поточечной сходимости операторов. Напоминание из прошлого семестра):

Пусть E_1 – банахово, E_2 – ЛНП. Причём $\{A_n\}_{n=1}^{\infty} \subset \mathcal{L}(E_1, E_2), A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$. Тогда

$$A_n \overset{\text{поточечно}}{\to} A \Leftrightarrow \begin{cases} \exists M\colon \forall n\colon \|A_n\| \le M \\ \exists S\colon [\langle S \rangle] = E_1\colon \forall s \in S\colon A_n s \to A s \end{cases}$$

Теорема 1.1.4 (Критерий слабой сходимости): Пусть E – ЛНП. Тогда последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset E$:

$$x_n \overset{w}{\to} x \Leftrightarrow \begin{cases} \left\{\|x\|_n\right\}_{n=1}^{\infty} \text{ ограничена} \\ \exists S\colon [\langle S\rangle]=E\colon \forall f\in S\colon f(x_n)\to f(x) \end{cases}$$

Доказательство: Перейдём к рассмотрению операторов $F_{x_n}, F_x \in E^{**}$. Тогда слабая сходимость $x_n \overset{w}{\to} x$ по определению является поточечной сходимостью $F_{x_n}(f) \to F_x(f)$.

Из условия:

- $E^{**} = \mathcal{L}(E^*, \mathbb{K})$
- Пространство E^* всегда полно
- Нормы $\left\|F_{x_n}\right\| = \|x_n\|$ ограничены
- $\exists S : \ [S] = E^* : \ \forall f \in S : \ F_{x_n} f \to F_x f$

Эти условия позволяют нам применить упомянутый выше критерий поточечной сходимости операторов из предыдущего семестра. А поточечная сходимость оператором во всём пространстве соответствует $x_n \overset{w}{\to} x$. □

Замечание 1.1.1: В случае рефлексивного банахова пространства E условие для слабой сходимости множно ослабить. Достаточно потребовать не сходимости $f(x_n) \to f(x)$, а существования предела $\lim_{n\to\infty} f(x_n)$ (тем самым, нам не нужно знать конкретный x).

1.2. Слабая сходимость и ограниченные операторы. Слабо ограниченные множества.

Теорема 1.2.1 (Слабая сходимость и ограниченные операторы):

Пусть E_1, E_2 – ЛНП, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset E_1, x \in E_1$, причём $x_n \overset{w}{\to} x$, а также $A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$. Тогда есть слабая сходимость образов:

$$Ax_n \overset{w}{\to} Ax$$

Доказательство: По определению слабой сходимости, выполняется

$$\forall f \in E_1^* : \ f(x_n) \underset{n\to\infty}{\to} f(x)$$

В частности, можно рассмотреть функционал $f = g \circ A$ для любого $g \in E_2^*$. Тогда

$$\forall g \in E_2^* : \ g(Ax_n) \underset{n\to\infty}{\to} g(Ax)$$

Это утверждение в точности совпадает с определением слабой сходимости $Ax_n \overset{w}{\to} Ax$. □

Определение 1.2.1: Множество $S \subseteq E$ называется **слабо ограниченным**, если

$$\forall f \in E^* : \ f(S) \text{ - ограниченное множество в } \mathbb{K}$$

Утверждение 1.2.1: Пусть $S \subseteq E$ – ограниченное множество. Тогда S слабо ограничено.

Доказательство: По определению, если $f \in E^*$, то это линейный ограниченный функционал.

Ограниченный функционал переводит ограниченные множества в ограниченные, по определению.

Поэтому слабая ограниченность S тривиальна. □

Теорема 1.2.2 (Хана): Пусть $S \subseteq E$ – слабо ограниченное множество. Тогда S ограничено.

Доказательство: Предположим противное, то есть S неограничено. Тогда

$$\exists \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subset S : \ \forall n \in \mathbb{N} : \ \|x_n\| \geq n^2$$

Рассмотрим последовательность $y_n = \frac{x_n}{n}$. В силу слабой ограниченности, мы можем сделать следующую оценку на образ $f(y_n), f \in E^*$ (где K_f – константа, ограничивающая образ $f(S)$):

$$\forall f \in E^* : \ |f(y_n)| = \frac{|f(x_n)|}{n} \leq \frac{K_f}{n} \underset{n \to \infty}{\to} 0$$

Стало быть, $y_n \overset{w}{\to} 0$. В силу критерия слабой сходимости, $\|y_n\| \leq M$ – есть ограниченность норм. Отсюда

$$\forall n \in \mathbb{N} : \ M \geq \|y_n\| = \frac{\|x_n\|}{n} \geq \frac{n^2}{n} = n$$

Противоречие. □

1.3. Замкнутый шар в Гильбертовом пространстве секвенциально компактен (теорема Банаха).

Определение 1.3.1: Множество $S \subseteq E$ называется **слабо секвенциально компактным** (или секвенциально слабо компактным), если из любой последовательности можно выделить слабо сходящуюся подпоследовательность:

$$\forall \{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq S : \ \exists \{n_k\}_{k=1}^{\infty} \subseteq \mathbb{N} : \ \exists x \in S : \ x_{n_k} \overset{w}{\to}_{k \to \infty} x$$

Теорема 1.3.1 (Банаха): Пусть H – гильбертово пространство. Тогда $\overline{B}(0, R)$ – слабо секвенциально компактное множество.

Доказательство:
1. Рассмотрим любую последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq \overline{B}(0, R)$. Хотим показать, что в ней выделяется слабо сходящаяся подпоследовательность $\left\{x_{n_k}\right\}_{k=1}^{\infty}$.
2. Рассмотрим $L = \left[\{x_n\}_{n=1}^{\infty}\right]$. В силу гильбертовости пространства H, мы можем воспользоваться теоремой о проекции. Тогда $H = L \oplus L^{\perp}$.
3. Выделим такую подпоследовательность $\{y_k\}_{k=1}^{\infty} \subseteq \{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, что есть сходимость для любого скалярного произведения с x_m:
$$\forall m \in \mathbb{N} : \ \exists \lim_{k\to\infty}(x_m, y_k)$$
Тогда, в силу критерия слабой сходимости (смотреть замечание после него), y_k будет слабо сходящейся последовательностью в L.
4. Заметим, что из имеющейся сходимости следует слабая сходимость и во всём пространстве H:
$$H = L \oplus L^{\perp} \Rightarrow \forall h = l + l^{\perp} : \ (y_k, h) = (y_k, l) + (y_k, l^{\perp}) = (y_k, l)$$
А (y_k, l) сходится в силу результата предыдущего пункта.

Единственная вещь, требующая пояснения – пункт 3, выделение слабо сходящейся последовательности. Воспользуемся диагональным методом Кантора:
1. Зафиксируем x_m. Тогда $(x_m, x_n) \leq R^2$ и, получается, $\{(x_m, x_n)\}_{n=1}^{\infty}$ является ограниченной последовательностью чисел. По теореме Больцано-Вейерштрасса, из неё можно выделить сходящуюся подпоследовательность x_{n_k}.
2. Итерируемся по $m \in \mathbb{N}$ (с началом $m = 1$ и последовательностью x_n) и выделяем новую подпоследовательность из той, что была получена на предыдущем шаге. Обозначаем их как $x_{m,n}$
3. Получили искомую последовательность $y_k = x_{k,k}$.

□

2. Обратимый оператор. Обратимость

2.1. Обратимость линейного, ограниченного снизу, оператора

Теорема 2.1.1: Пусть $A \in \mathcal{L}(E)$ – взаимно однозначный оператор $E \to \operatorname{Im} A$. Тогда обратный оператор A^{-1} будет ограничен тогда и только тогда, когда образы A оцениваются снизу:
$$\exists m : \ \forall x \in E : \ \|Ax\| \geq m\|x\|$$

Доказательство: $\Rightarrow$ В силу ограниченности оператора A^{-1}, можно записать следующее:
$$\forall y = Ax : \ \|x\| = \left\|A^{-1}y\right\| \leq \left\|A^{-1}\right\|\|y\| = \left\|A^{-1}\right\|\|Ax\|$$
Отсюда имеем $\|Ax\| \geq \frac{1}{\|A^{-1}\|}\|x\|$.

$\Leftarrow$ Раз A – биекция, то и A^{-1} тоже. Поэтому вместо x можно подставить соответствующий ему $A^{-1}y, y \in \operatorname{Im} A$:
$$\forall y \in \operatorname{Im} A : \ \left\|AA^{-1}y\right\| \geq m\left\|A^{-1}y\right\| \Leftrightarrow \left\|A^{-1}y\right\| \leq \frac{1}{m}\|y\|$$

А это в точности ограниченность оператора A^{-1}. □

2.2. Обратимость возмущённого оператора

Теорема 2.2.1: Пусть E – банахово пространство, $A \in \mathcal{L}(E)$, причём $\|A\| < 1$. Тогда оператор $(I + A)$ обратим. Более того, справедлива формула

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

Замечание 2.2.1: Выписанный ряд называется **рядом Неймана**.

Доказательство: Нужно доказать, что ряд справа действительно является обратным к оператору $(I + A)$. Обозначим $S_n = \sum_{k=0}^{n} (-1)^k A^k$.

1. Покажем, что S_n сходится к некоторому $S \in \mathcal{L}(E)$. Во-первых, $S_n \in \mathcal{L}(E)$ тривиальным образом, а в силу банаховости $\mathcal{E}$, достаточно проверить фундаментальность этой последовательности:
$$\|S_{n+p} - S_n\| = \left\|\sum_{k=n+1}^{n+p} (-1)^k A^k\right\| \leq \sum_{k=n+1}^{n+p} \|A\|^k < \varepsilon$$
Последнее неравенство выполняется, начиная с некоторого n, так как $\|A\|, \|A\|^2, ...$ образуют геометрическую прогрессию со знаменателем < 1.
2. Так как многочлены от одного и того же оператора коммутируют, то если мы покажем, что предел
$$\lim_{n\to\infty} S_{n(I+A)} = I \Rightarrow S(I + A) = I = (I + A)S$$
и всё доказано.
Раскроем выражение под пределом:
$$S_n(I + A) = S_n + S_n A = \sum_{k=0}^{n} (-1)^k A^k + \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{k-1} A^k =$$
$$= A^0 + (-1)^n A^{n+1} = I + (-1)^n A^{n+1}$$
Оценим норму последнего слагаемого:
$$\left\|(-1)^n A^{n+1}\right\| \leq \|A\|^{n+1} \underset{n\to\infty}{\to} 0$$
Стало быть, $\lim_{n\to\infty} S_{n(I+A)} = I + 0$, что и требовалось доказать.

□

Теорема 2.2.2: Пусть E – банахово пространство, $A \in \mathcal{L}(E)$ и $A^{-1} \in \mathcal{L}(E)$. Также пусть $\Delta A \in \mathcal{L}(E)$, причём $\|\Delta A\| < \frac{1}{\|A^{-1}\|}$. Тогда $(A + \Delta A)^{-1} \in \mathcal{L}(E)$.

Доказательство: Сведём теорему к предыдущей:
$$A + \Delta A = A(I + A^{-1}\Delta A)$$
Проверим, что норма оператора из скобки удовлетворяет условию на норму:
$$\left\|A^{-1}\Delta A\right\| \leq \left\|A^{-1}\right\| \cdot \|\Delta A\| < 1$$
□

2.3. Формулировка теормы Банаха об обратном операторе. Доказательство в случае гильбертова пространства.

Теорема 2.3.1 (Банаха об обратном операторе): Пусть E_1, E_2 – банаховы пространства, $A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$ – биективный оператор. Тогда $A^{-1} \in \mathcal{L}(E_2, E_1)$.

Доказательство: Случай, когда $E_1 = E_2 = H$ – гильбертово пространство над полем $\mathbb{C}$.

Основная идея состоит в том, чтобы доказать утверждение теоремы не для A, а для A^*. Запишем 2 разложения пространства H (тема про сопряжённый оператор и разложение будет далее):

$$[\text{Im } A] \oplus \text{Ker } A^* = H$$
$$[\text{Im } A^*] \oplus \text{Ker } A = H$$

Так как A биективен, то $\text{Ker } A = \{0\}$ и мы сразу получаем $[\text{Im } A^*] = H$. С другой стороны, $[\text{Im } A] = \text{Im } A = H$, а потому $\text{Ker } A^* = \{0\}$. □

3. Сопряжённый оператор

3.1. Норма сопряжённого оператора (в ЛНП)

Определение 3.1.1: Пусть $A : E_1 \to E_2$. Тогда **сопряжённым оператором** $A^* : E_2^* \to E_1^*$ называется оператор, удовлетворяющий условию:

$$\forall g \in E_2^* : \forall x \in E_1 : \ (A^* g)x = g(Ax)$$

Теорема 3.1.1: Пусть $A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$. Тогда $A^* \in \mathcal{L}(E_2^*, E_1^*)$, причём $\|A^*\| = \|A\|$.

Доказательство: Покажем неравенства для норм в 2 стороны:

$\leq$ Верна следующая оценка:

$$\forall g \in E_2^* : \forall x \in E_1 : \ |(A^* g)x| = |g(Ax)| \leq \|g\|\|Ax\| \leq \|g\|\|A\|\|x\|$$

Из последнего имеем $\|A^* g\| \leq \|A\|\|g\|$, что означает $\|A^*\| \leq \|A\|$.

$\geq$ Так как $A^* \in \mathcal{L}(E_2^*, E_1^*)$, то можно воспользоваться следствием теоремы Хана-Банаха для нормы элемента Ax:

$$\forall x \in E_1 : \ \|Ax\| = \sup_{\|g\|=1} |g(Ax)| = \sup_{\|g\|=1} |(A^* g)x|$$

При этом $\|(A^* g)x\| \leq \|A^*\| \cdot 1 \cdot \|x\|$, а значит $\|Ax\| \leq \|A^*\|\|x\| \Rightarrow \|A\| \leq \|A^*\|$.

□

3.2. Сопряжённые операторы в гильбертовом пространстве. Равенство $H = [\text{Im } A] \oplus \text{Ker } A^*$

Определение 3.2.1: Пусть $E_1 = H_1, E_2 = H_2$ – гильбертовы пространства, $A \in \mathcal{L}(H_1, H_2)$. Тогда **эрмитово сопряжённым оператором** $A^* : H_2 \to H_1$ называется оператор, удовлетворяющий условию:

$$\forall x \in E_1 : \forall y \in E_2 : \ (Ax, y)_{H_2} = (x, A^* y)_{H_1}$$

Теорема 3.2.1: Пусть H – гильбертово пространство, $A \in \mathcal{L}(H)$. Тогда

$$H = [\mathrm{Im}\ A] \oplus \mathrm{Ker}\ A^*$$

Доказательство:

1. Покажем, что $(\mathrm{Im}\ A)^{\perp} = \mathrm{Ker}\ A^*$. Для этого рассмотрим произвольный элемент ортогонального дополнения:
$$\forall y \in (\mathrm{Im}\ A)^{\perp} : \forall x \in H : \ (Ax, y) = 0$$
Стало быть, для любых x, y выше будет $(x, A^* y) = 0$, а в силу гильбертовости пространства это означает, что $A^* y = 0$, что означает $y \in \mathrm{Ker}\ A^*$.
2. Заметим, что $(\mathrm{Im}\ A)^{\perp} = [\mathrm{Im}\ A]^{\perp}$. Так как последнее является подпространством, то по теореме о проекции получаем требуемое разложение:
$$H = [\mathrm{Im}\ A] \oplus [\mathrm{Im}\ A]^{\perp} = [\mathrm{Im}\ A] \oplus \mathrm{Ker}\ A^*$$

□

4. Спектр. Резольвента.

4.1. Операторозначные функции комплексного переменного. Аналитичность резольвенты. Спектральный радиус. Основная теорема о спектре

Определение 4.1.1: **Резольвентным множеством** оператора A называется следующее множество:

$$\rho(A) = \left\{ \lambda \in \mathbb{C} \mid \exists (A - \lambda I)^{-1} \in \mathcal{L}(E) \right\}$$

Все $\lambda \in \mathbb{C}$, попадающие в резольвентное множество, называются **регулярными значениями**.

Определение 4.1.2: **Спектром** оператора A называется дополнение к резольвентному множеству:

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

Определение 4.1.3: **Резольвентой** оператора A называется любое отображение следующего вида:

$$R_\lambda \coloneqq R(\lambda) \coloneqq (A - \lambda I)^{-1}, \lambda \in \rho(A)$$

Утверждение 4.1.1: $R(\lambda)$ является непрерывной функцией от λ.

Доказательство: Положим $B = A - \lambda_0 I$ и $\Delta B = -\Delta\lambda I$.

Как мы уже доказывали выше, мы можем рассмотреть $\Delta\lambda$ с ограничением $|\Delta\lambda| < \frac{1}{\|B^{-1}\|}$ и тогда $B + \Delta B$ будет обратим.

Для непрерывности, нам нужно оценить норму следующей разности при $\Delta\lambda \to 0$:

$$\|R(\lambda_0 + \Delta\lambda) - R(\lambda_0)\| = \left\|(B + \Delta B)^{-1} - B^{-1}\right\|$$

Распишем $(B + \Delta B)^{-1}$ через ряд Неймана следующим образом:

$$(B + \Delta B)^{-1} = \left(I + B^{-1}\Delta B\right)^{-1} B^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \left(B^{-1}\Delta B\right)^k B^{-1} =$$

$$= B^{-1} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(B^{-1}\Delta B\right)^k B^{-1}$$

Отсюда можно вернуться к оценке приращение и уже работать с рядом:

$$\left\|(B + \Delta B)^{-1} - B^{-1}\right\| = \left\|\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(B^{-1}\Delta B\right)^k B^{-1}\right\| \leq$$

$$\left\|B^{-1}\right\| \sum_{k=1}^{\infty} \left(\left\|B^{-1}\right\| \|\Delta B\|\right)^k = \left\|B^{-1}\right\| \cdot \frac{\|B^{-1}\|\|\Delta B\|}{1 - \|B^{-1}\|\|\Delta B\|} \underset{\Delta B \to 0}{\to} 0$$

□

Замечание 4.1.1: Далее будет использоваться обозначение

$$A_\lambda \coloneqq A - \lambda I$$

Утверждение 4.1.2: Пусть $\lambda_0, \lambda \in \rho(A)$. Тогда

$$R_\lambda - R_{\lambda_0} = (\lambda - \lambda_0) R_\lambda R_{\lambda_0}$$

Доказательство:

Рассмотрим следующую тривиальную цепочку равенств:

$$R_\lambda - R_{\lambda_0} = R_\lambda \underbrace{A_{\lambda_0} R_{\lambda_0}}_{I} - \underbrace{A_\lambda R_\lambda}_{I} R_{\lambda_0} =$$

$$R_{\lambda\left(A_{\lambda_0} - A_\lambda\right)} R_{\lambda_0} = R_{\lambda(\lambda - \lambda_0)} R_{\lambda_0} = (\lambda - \lambda_0) R_\lambda R_{\lambda_0}$$

□

Утверждение 4.1.3: $R(\lambda)$ дифференцируема на $\rho(A)$. Более того:

$$R'(\lambda_0) = R_{\lambda_0}^2$$

Доказательство: Запишем дроби из предела производной:

$$\frac{R_\lambda - R_{\lambda_0}}{\lambda - \lambda_0} = \frac{(\lambda - \lambda_0) R_\lambda R_{\lambda_0}}{\lambda - \lambda_0} = R_\lambda R_{\lambda_0} \underset{\lambda \to \lambda_0}{\to} R_{\lambda_0}^2$$

□

Определение 4.1.4: **Спектральным радиусом** оператора A называется радиус окружности с центром в нуле, в которую попадают все элементы спектра:

$$r(A) = \sup_{\lambda \in \sigma(A)} |\lambda|$$

Утверждение 4.1.4: Если $|\lambda| > \|A\|$, то $\lambda \in \rho(A)$.

Доказательство: Перепишем A_λ следующим образом:

$$A_\lambda = -\lambda\left(I - \frac{1}{\lambda}A\right)$$

Так как $\left\|\frac{A}{\lambda}\right\| = \frac{1}{|\lambda|}\|A\| < 1$, то применима теорема об обратимости возмущённого оператора и, соответственно, этот оператор обратим. Значит $\lambda \in \rho(A)$ по определению. □

Следствие 3.2.1.1: Очевидно следует, что $r(A) \leq \|A\|$.

Утверждение 4.1.5: Радиус сходимости ряда Неймана для $R(\lambda)$ равен спектральному радиусу $r(A)$.

Доказательство: $\leq$ Мы можем говорить о ряде Лорана. Если $|\lambda| > \|A\|$, то тогда имеет место следующее представление резольвенты:

$$R(\lambda) = (A - \lambda I)^{-1} = -\frac{1}{\lambda}\left(I - \frac{A}{\lambda}\right)^{-1} = -\frac{1}{\lambda}\sum_{k=0}^{\infty} A^k \lambda^{-k}$$

При этом, ранее было установлено, что $R(\lambda)$ дифференцируема на $\rho(A)$. В частности, это происходит на круге $|\lambda| > r(A)$.

Так как представление функции в виде ряда Лорана в круге единственно, а мы уже его записали выше для некоторой окрестности бексконечности, то тот же самый вид должен быть и в этом круге.

Значит, радиус сходимости ряда Неймана не превосходит $r(A)$.

$\geq$ Пусть $|\lambda_0| < r(A)$. Тогда, предположим, что ряд сходится в этой точке. Это означает, что ряд будет сходится и при всех $|\lambda| > |\lambda_0|$.

Это также означает обратимость A_λ при всех таких λ, но коль скоро $|\lambda_0| < r(A)$, то должен существовать $|\lambda_0| < |\lambda_1| < r(A)$ такой, что $\lambda_1 \in \sigma(A)$ в силу определения спектрального радиуса, а это противоречит определению спектра. □

Утверждение 4.1.6: Если $\lambda \in \sigma(A)$, то $\lambda^n \in \sigma(A^n)$.

Доказательство: Предположим противное, то есть $\lambda^n \in \rho(A^n)$ и $\lambda \in \sigma(A)$. Значит $(A^n - \lambda^n I)^{-1} \in \mathcal{L}(E)$. Заметим, что мы также можем записать обращаемый оператор в следующем виде:

$$A^n - \lambda^n I = (A - \lambda I)\underbrace{(A^{n-1} + ... + \lambda^{n-1} I)}_{B} \Rightarrow I = (A - \lambda I)B(A^n - \lambda^n I)^{-1}$$

Так как рассматриваемые операторы – многочлены от степеней A, то они коммутируют. С учётом этого имеем, что A_λ обратим, а стало быть $\lambda \in \rho(A)$, противоречие. □

Утверждение 4.1.7: Верна формула для спектрального радиуса:

$$r(A) = \lim_{n\to\infty} \sqrt[n]{\|A^n\|}$$

Доказательство: Как мы уже знаем, радиус сходимости ряда Неймана для $R(\lambda)$ совпадает с $r(A)$:

$$r(A) = r_{\text{сх}} = \overline{\lim}_{n\to\infty} \sqrt[n]{\|A^n\|}$$

В силу последнего доказанного утверждения, мы можем связать $r(A)$ и $r(A^n)$ следующим образом:

$$r(A^n) = \sup_{\mu\in\sigma(A^n)}|\mu| \geq \sup_{\lambda\in\sigma(A)}|\lambda^n| = r(A)^n$$

Стало быть, $r(A) \leq \sqrt[n]{r(A^n)}$. При этом, знаем, что $r(A^n) \leq \|A^n\|$.

Получилось, что верхний предел не превосходит любого элемента последовательности $\sqrt[n]{\|A^n\|}$, а это означает, что он не превосходит их нижнего предела. Такое возможно только тогда, когда существует просто предел. □

Теорема 4.1.1 (Основная теорема о спектре): Спектр оператора непуст:

$$\sigma(A) \neq 0$$

Доказательство: Предположим противное. Тогда $\rho(A) = \mathbb{C}$ и, следовательно, $R(\lambda)$ является целой функцией. Оценим норму этого оператора, пользуясь представлением обратного оператора в ряд Неймана:

$$\|R(\lambda)\| \leq \frac{1}{|\lambda|} \cdot \frac{1}{1-\frac{1}{|\lambda|}\|A\|} \underset{\lambda\to\infty}{\to} 0$$

Коль скоро есть предел $\lim_{\lambda\to\infty}\|R(\lambda)\|$, то норма $R(\lambda)$ ограничена. Стало быть, по теореме Лиувилля $R(\lambda) = \text{const}$. Более того, из-за найденного выше предела $R(\lambda) = 0$. Это противоречит обратимости A_λ при каком-либо λ. □

Определение 4.1.5: Рассмотрим оператор $A \in \mathcal{L}(E)$. Тогда
- $\sigma_{p(A)} := \{\lambda \in \sigma(A) \mid \text{Ker } A_\lambda \neq \{0\}\}$ – **точечный спектр**.
- $\sigma_{c(A)} := \{\lambda \in \sigma(A) \mid \text{Ker } A_\lambda = \{0\} \wedge \text{Im } A_\lambda \neq E \wedge [\text{Im } A_\lambda] = E\}$ – **непрерывный спектр**.
- $\sigma_{r(A)} := \{\lambda \in \sigma(A) \mid \text{Ker } A_\lambda = \{0\} \wedge [\text{Im } A_\lambda] \neq E\}$ – **остаточный спектр**.

5. Самосопряжённые операторы

5.1. Свойства квадратичной формы (Ax, x) и собственных значений самосопряжённого оператора A.

Определение 5.1.1: Пусть $E_1 = E_2 = H$ – гильбертово пространство. Тогда, если $A \in \mathcal{L}(H)$ и $A^* = A$, то оператор A называется **самосопряжённым**:

$$\forall x, y \in H: \ (Ax, y) = (x, Ay)$$

Определение 5.1.2: **Квадратичной формой** оператора A называется функционал, определённый следующим образом:

$$K(x) = (Ax, x)$$

Утверждение 5.1.1: Пусть $A \in \mathcal{L}(H)$ – произвольный оператор. Если $\forall x \in H : K(x) = 0$, то $A \equiv 0$.

Доказательство: Рассмотрим произвольные $x, y \in H$. Тогда $x + y, x + iy \in H$.

Запишем по определению квадратичную форму для этих точек:

$$K(x+y) = (A(x+y), x+y) = \underbrace{K(x)}_{0} + \underbrace{K(y)}_{0} + (Ax, y) + (Ay, x)$$

$$K(x+iy) = (A(x+iy), x+iy) = \underbrace{K(x)}_{0} - \underbrace{K(y)}_{0} - i(Ax, y) + i(Ay, x)$$

Отсюда $(Ax, y) = \frac{1}{2}(K(x+y) + iK(x+iy)) = 0$. Если варьировать y по всем возможным значениям, то следствие теоремы Хана-Банаха даст равенство $\forall x \in H : Ax = 0$. □

Теорема 5.1.1:
1. Оператор A самосопряжён тогда и только тогда, когда $\forall x \in H : \ K(x) \in \mathbb{R}$.
2. Если λ – собственное значение самосопряжённого A, то $\lambda \in \mathbb{R}$.
3. Если $\lambda_1 \neq \lambda_2$ – собственные значения самосопряжённого A, а $e_1, e_2 \in H$ – соотстветствующие собственные вектора, то $(e_1, e_2) = 0$.

Доказательство:
1. Проведём доказательство в обе стороны.

   $\Rightarrow$ Скалирное произведение эрмитово, поэтому воспользуемся свойством перестановки аргументов:

   $$K(x) = (Ax, x) = (x, Ax) = \overline{(Ax, x)} \Rightarrow K(x) \in \mathbb{R}$$

   $\Leftarrow$ Аналогично первому пункту, имеем

   $$K(x) = (Ax, x) = \overline{(Ax, x)} = (x, Ax)$$

   В то же время, $(Ax, x) = (x, A^*x)$ по определению. Стало быть, квадратичная форма для $A - A^*$ нулевая.

   По доказанному утверждению, это возможно лишь в том случае, когда $A - A^* \equiv 0$, что и требовалось.
2. Пусть $Av = \lambda v$. Тогда

   $$K(v) = (Av, v) = \lambda(v, v) \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \lambda \in \mathbb{R}$$

3. Заметим следующее соотношение:
$$\lambda_1(e_1, e_2) = (Ae_1, e_2) = (e_1, Ae_2) = \lambda_2(e_1, e_2)$$
Так как $\lambda_1 \neq \lambda_2$, то такое возможно только тогда, когда $(e_1, e_2) = 0$.

□

5.2. Разложение гильбертова пространства $H = [\mathrm{Im}\ A_\lambda] \oplus \mathrm{Ker}\ A_\lambda$, где A – самосопряжённый оператор.

Теорема 5.2.1: Для самосопряжённого A верно равенство
$$\forall \lambda \in \mathbb{C}: \ [\mathrm{Im}\ A_\lambda] \oplus \mathrm{Ker}\ A_\lambda = H$$

Доказательство: Воспользуемся обычной теоремой о разложении для сопряжённых операторов. Тогда
$$[\mathrm{Im}\ A_\lambda] \oplus \mathrm{Ker}\ A^*_\lambda = H$$
При этом $A^*_\lambda = A^* - \overline{\lambda} I = A - \overline{\lambda} I$.

Если $\lambda \in \mathbb{R}$, то всё доказано. Иначе $\lambda \neq \mathbb{R}$, но это также значит, что $\lambda \notin \sigma_p(A)$, а это эквивалентно $\mathrm{Ker}\ A_\lambda = \{0\}$. То же самое верно и для $\overline{\lambda}$, откуда тоже получаем тривиальное доказательство. □

5.3. Критерий принадлежности числа спектру самосопряжённого оператора. Вещественность спектра самосопряжённого оператора.

Теорема 5.3.1 (Критерий принадлежности спектру самосопряжённого оператора):
1. $\lambda \in \rho(A) \Leftrightarrow A_\lambda$ – ограниченный снизу, то есть $\exists m > 0 : \forall x \in H : \ \|A_\lambda x\| \geq m\|x\|$
2. $\lambda \in \sigma(A) \Leftrightarrow \exists \{x_n\}_{n=1}^\infty \subset H : \|x_n\| = 1 \wedge \lim_{n\to\infty} \|A_\lambda x_n\| = 0$

Доказательство: Второй пункт – отрицание обеих частей первого. Поэтому доказывать будем только первую эквивалентность.

$\Rightarrow$ Раз $\lambda \in \rho(A)$, то A_λ обратим, а значит биективен. По теоереме об ограниченности снизу обратимого оператора всё доказано.

$\Leftarrow$ По той же теореме, должны доказать, что A_λ биективен. Из ограниченности снизу следует $\mathrm{Ker}\ A_\lambda = \{0\}$ (иначе образом ненулевого элемента был бы ноль, что нарушило бы ограниченность), а в силу разложения пространство имеем следующее:
$$[\mathrm{Im}\ A_\lambda] \oplus \mathrm{Ker}\ A_\lambda = H = [\mathrm{Im}\ A_\lambda]$$
Также по лемме о замыкании образа ограниченного снизу оператора, имеем
$$\mathrm{Im}\ A_\lambda = [\mathrm{Im}\ A_\lambda] = H$$

□

Утверждение 5.3.1: Пусть A – самосопряжённый, а $\lambda = \mu + i\nu, \nu \neq 0$. Тогда
$$\|A_\lambda x\|^2 \geq \|\nu\|^2 \|x\|^2$$

Доказательство: Заметим, что $A_\lambda = A - \lambda I = A - (\mu + i\nu)I = A_\mu - i\nu I$.

Так как речь идёт о квадрате нормы, то мы можем расписать её через скалярное произведение:
$$\|A_\lambda x\|^2 = (A_\lambda x, A_\lambda x) = \left\|A_\mu x\right\|^2 - i\nu\big(x, A_\mu x\big) + i\nu\big(A_\mu x, x\big) + \|\nu\|^2 \|x\|^2$$

Так как $\mu \in \mathbb{R}$, то A_μ – самосопряжённый оператор. Стало быть, мы можем сократить слагаемые в середине. Тогда:
$$\|A_\lambda x\|^2 = \left\|A_\mu x\right\|^2 + \|\nu\|^2 \|x\|^2 \geq \|\nu\|^2 \|x\|^2$$

По доказанной лемме, A_λ ограничен снизу. В силу критерия принадлежности спектру, такое возможно лишь в том случае, когда $\lambda \in \rho(A)$. □

Следствие 5.3.1.1: Для самосопряжённого оператора A верно:
$$\sigma(A) \subseteq \mathbb{R}$$

5.4. Теорема о спектре самосопряжённого оператора: $\sigma(A) \subseteq [m_-, m_+], r(A) = \|A\|$

Теорема 5.4.1: Обозначим для самосопряжённого A: $m_- := \inf_{\|x\|=1}(Ax, x)$ и $m_+ := \sup_{\|x\|=1}(Ax, x)$. Тогда:
1. $\sigma(A) \subseteq [m_-, m_+]$, причём $m_-, m_+ \in \sigma(A)$
2. $\|A\| = r(A) = \max\big(|m_-|, |m_+|\big)$

Доказательство:
1. Покажем, что если $\lambda > m_+$, то $\lambda \in \rho(A)$. Будем снова ограничивать $\|A_\lambda x\|$ снизу. С одной стороны, по КБШ:
$$|(A_\lambda x, x)| \leq \|A_\lambda x\| \|x\| \Rightarrow \|A_\lambda x\| \geq \tfrac{1}{\|x\|} |(A_\lambda x, x)|$$
С другой стороны, распишем скалярное произведение:
$$|(A_\lambda x, x)| = |(Ax, x) - \lambda(x, x)| = \lambda \|x\|^2 - (Ax, x) \geq (\lambda - m_+)\|x\|^2$$
Последний переход верен, так как
$$m_+ = \sup_{\|x\|=1}(Ax, x) = \sup_x \tfrac{Ax, x}{\|x\|^2} \Rightarrow (Ax, x) \leq m_+ \|x\|^2 < \lambda \|x\|^2$$
Отсюда сразу $\lambda \in \rho(A)$. Теперь докажем, что $m_+ \in \sigma(A)$. Для этого воспользуемся критерием принадлежности спектру. В силу определения m_+:
$$\exists \{x_n\}_{n=1}^\infty \subseteq H : \|x_n\| = 1 \wedge \lim_{n\to\infty}(Ax_n, x_n) = m_+$$
Надо показать, что предел $\lim_{n\to\infty}\left\|A_{m_+} x_n\right\| = 0$. Так как норма векторов единична, то текущий предел можно переписать в следующем виде:
$$\lim_{n\to\infty}(Ax_n, x_n) - m_+ = 0 = \lim_{n\to\infty}(Ax_n, x_n) - m_+(x_n, x_n) =$$
$$\lim_{n\to\infty}\Big(A_{m_+} x_n, x_n\Big) = 0$$
Также из определения m_+ следует, что A_{m_+} – отрицательно полуопределённый оператор.

Так как неравенство КБШ справедливо для скалярных произведений, порождённый положительными полуопределёнными операторами, то перейдём к $B = -A_{m_+}$. Чтобы получить требуемое, нам достаточно показать, что $\lim_{n\to\infty} Bx_n = 0$.

Запишем четвёртую! степень нормы следующим образом:

$$\|Bx_n\|^4 = \left|(x_n, Bx_n)_B^2\right| \leq \left|(x_n, x_n)_B\right|\left|(Bx_n, Bx_n)_B\right| = \left|(Bx_n, x_n)\right|\left|(B^2x_n, Bx_n)\right|$$

Первый множитель стремится к нулю, а второй ограничен:

$$\left|(B^2x_n, Bx_n)\right| \leq \|B^2x_n\|\|Bx_n\| \leq \|B\|^3\|x_n\|^2 = \|B\|^3$$

Требуемый предел установлен. Доказательство для m_- аналогично.

2. Из формулы спектрального радиуса

$$r(A) = \lim_{n\to\infty} \sqrt[n]{\|A^n\|}$$

Докажем, что для $n = 2^k$ верно равенство $\|A^n\| = \|A\|^n$.

Достаточно доказать, что $\left\|A^2\right\| = \|A\|^2$.

$\leq$ Воспользуемся неравенством для ограниченнх операторов:

$$\left\|A^2x\right\| = \|A(Ax)\| \leq \|A\|\|Ax\| \leq \|A\|^2\|x\| \Rightarrow \left\|A^2\right\| \leq \|A\|^2$$

$\geq$ Распишем квадрат нормы $\|Ax\|^2$:

$$\|Ax\|^2 = (Ax, Ax) = (x, A^2x) \leq \|x\|\left\|A^2\right\|\|x\|$$

Осталось взять супремум от обеих частей неравенства:

$$\|A\|^2 = \sup_{\|x\|=1} \|Ax\|^2 \leq \sup_{\|x\|=1}\left\|A^2\right\|\|x\|^2 = \left\|A^2\right\|$$

Так как предел в формуле спектрального радиуса существует, то достаточно найти любой частичный предел. Будем брать предел по индексам-степеням двойки.

□

6. Компактные операторы

6.1. Свойства компактных операторов

Определение 6.1.1: Оператор A называется **компактным**, если

$$\forall M \subseteq E_1 \text{ - ограниченное} \Rightarrow A(M) \subseteq E_2 \text{ - предкомпакт (вполне ограниченное)}$$

Множество компактных операторов обозначается как $\mathcal{K}(E_1, E_2)$.

Утверждение 6.1.1: Имеют место следующие утверждения:
1. $\dim E_1 < \infty \Rightarrow \mathcal{L}(E_1, E_2) = \mathcal{K}(E_1, E_2)$
2. $\dim E_2 < \infty \Rightarrow \mathcal{L}(E_1, E_2) = \mathcal{K}(E_1, E_2)$

Доказательство: Достаточно понимать, что в конечномерном пространстве любое ограниченное множество вполне ограниченно.

1. Коль скоро $\dim \operatorname{Im} A \leq \dim E_1 < \infty$, то образ любого ограниченного множества оказывается ограниченным множеством в подпространстве $\operatorname{Im} A$ конечной размерности.

2. Сразу следует из исходного заявления в доказательстве.

□

Замечание 6.1.1: Пусть R – кольцо, I – подгруппа $(R, +)$. Тогда I называется **левосторонним идеалом**, если I обладает свойством **поглощения слева**:

$$\forall r \in R : \forall a \in I : \; ra \in I$$

Аналогично определяется **правосторонний идеал**. Ну и **двухсторонний идеал**, если он является и левосторонним, и правосторонним.

Утверждение 6.1.2: Пусть $E_1 = E_2 = E$. Тогда $\mathcal{K}(E) \subseteq \mathcal{L}(E)$ – двухсторонний идеал.

Доказательство:

1. $\mathcal{K}(E)$ является подгруппой по сложению. Пусть $A, B \in \mathcal{K}(E)$. Тогда $A + B \in \mathcal{K}(E) \Leftrightarrow (A + B)(B(0,1))$ – предкомпакт.

   Это эквивалентно тому, что из любой ограниченной последовательности в этом множество можно выделить сходящуюся подпоследовательность. Действительно, рассмотрим ограниченную последовательность $\{y_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq (A + B)(B(0,1))$. В силу определения, её элементы распишутся так:

   $$\forall n \in \mathbb{N} : y_n = Ax_n + Bx_n; \; x_n \in B(0,1)$$

   Так как $A \in \mathcal{K}(E)$, то из Ax_n можно выделить сходящуюся подпоследовательность Ax_{n_k}.

   Аналогично, уже из Bx_{n_k} можно выделить сходящуюся подподпоследовательность $Bx_{n_{k_l}}$, причём предыдущая сходимость никуда не денется.

2. $\mathcal{K}(E)$ поглощает элементы $\mathcal{L}(E)$. Пусть $A \in \mathcal{K}(E)$ и $B \in \mathcal{L}(E)$. Тогда $AB \in \mathcal{K}(E)$ – ибо $B(B(0,1))$ тоже ограниченной множество.

   Для BA сложнее, но мы можем воспользоваться приёмом предыдущего пункта. Рассмотрим ограниченную последовательность $\{y_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq BA(B(0,1))$. Тогда $y_n = BAx_n, x_n \in B(0,1)$. В силу компактности оператора A, можно из Ax_n выделить сходящуюся подпоследовательность Ax_{n_k}. Так как оператор B непрерывен, сходимость в образе сохранится, а значит нужная подпоследовательность $y_{n_k} = BAx_{n_k}$ найдена.

□

Утверждение 6.1.3: Если $\dim E = \infty$, то тождественный оператор $I \notin \mathcal{K}(E)$.

Доказательство: Действительно, по теореме Рисса мы знаем, что замкнутый единичный шар в таком пространстве не компактен, а значит $B(0,1) = I(B(0,1))$ не может быть предкомпактом. □

Следствие 5.4.1.1: Если $\dim E = \infty, A \in \mathcal{K}(E)$, то $A^{-1} \notin \mathcal{L}(E)$.

Доказательство: Предположим противное. Тогда $I = AA^{-1} \in \mathcal{K}(E)$, чего не может быть. □

Утверждение 6.1.4: Если $A \in \mathcal{K}(E_1, E_2)$ и $x_n \xrightarrow{w} x_0 \in E_1$, то $Ax_n \xrightarrow{w} Ax_0$.

Доказательство: Пусть $x_n \xrightarrow{w} x_0$. Тогда $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ – ограниченная, а значит $\{Ax_n\}_{n=1}^{\infty}$ – предкомпакт. Более того, из слабой сходимости аргументов и непрерывности A следует слабая сходимость $Ax_n \xrightarrow{w} Ax_0$. □

Теорема 6.1.1: Пусть E_2 – банахово пространство, $A_n \in \mathcal{K}(E_1, E_2), A \in \mathcal{L}(E_1, E_2)$, причём $\lim_{n\to\infty} A_n = A$. Тогда $A \in \mathcal{K}(E_1, E_2)$.

Доказательство: В силу банаховости E_2 для компактности оператора A достаточно проверить, что $A(B(0,1))$ является вполне ограниченным множеством.

Идея состоит в том, чтобы взять достаточно близкий оператор A_n, взять соответствующую ему ε-сеть и заявить, что она подойдёт к A:

- $\forall \varepsilon > 0 : \exists n_0 \in \mathbb{N} : \left\|A - A_{n_0}\right\| < \varepsilon$
- $\forall \varepsilon > 0 : \exists \{y_t\}_{t=1}^{T} \subseteq E : \forall x \in B(0,1) : \exists s : \left\|A_{n_0}x - y_s\right\| < \varepsilon$

Зафиксиоуем $\varepsilon > 0, n_0 \in \mathbb{N}$ и $\{y_t\}_{t=1}^{T} \subseteq E$ согласно утверждениям выше. Тогда:

$$\forall x \in B(0,1) : \exists y_s : \ \|Ax - y_s\| \leq \left\|Ax - A_{n_0}x\right\| + \left\|A_{n_0}x - y_s\right\| < 2\varepsilon$$

Стало быть, $\{y_t\}_{t=1}^{T}$ – это конечная 2ε-сеть для $A(B(0,1))$, то есть образ вполне ограничен. □

6.2. Свойства собственных значений компактного оператора.

Теорема 6.2.1: Пусть $\lambda \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$. Тогда $\dim \operatorname{Ker} A_\lambda < \infty$. Где A – компактный, а λ – его СЗ.

Доказательство: Утверждение теоремы эквивалентно тому, что единичная сфера в пространстве $\operatorname{Ker} A_\lambda$ компактна.

Это будет доказано, если мы покажем, как выделить из любой последовательности сходящуюся подпоследовательность. Пусть $\{x_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq S(0,1) \subseteq \operatorname{Ker} A_\lambda$. Отсюда $\|x_n\|$ и $Ax_n = \lambda x_n$. Более того, $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ – ограниченное множество, а значит $\{Ax_n\}_{n=1}^{\infty}$ – предкомпакт.

Стало быть, существует сходящаяся подпоследовательность $\lim_{k\to\infty} Ax_{n_k} = y$. В силу того, что мы можем раскрыть образ через x_{n_k}, получим следующее:

$$\lim_{k\to\infty} \lambda x_{n_k} = y \Leftrightarrow \lim_{k\to\infty} x_{n_k} = \frac{y}{\lambda}$$

Однако, это ещё не все. Нам также нужно показать, что $y \in \text{Ker } A_\lambda$ – принадлежит рассматриваемому подпространству. Для этого мы применим оператор A к обеим частям предела:

$$\lim_{k\to\infty} Ax_{n_k} = y = \frac{1}{\lambda} Ay \Leftrightarrow Ay = \lambda y \Leftrightarrow y \in \text{Ker } A_\lambda$$

□

Теорема 6.2.2: Для любого $\delta > 0$ вне любого круга $\{|\lambda| \leq \delta\}$ может лежать лишь конечное число собственных значений компактного оператора A.

Доказательство: Проведём доказательство в частном случае $E = H$ – гильбертово пространство, и A – компактный самосопряжённый оператор.

Предположим противное. Тогда, должна существовать $\delta_0 > 0$ и хотя бы счётное число $\{\lambda_n\}_{n=1}^{\infty}$ собственных значений вне этого круга.

Пусть e_n – нормированный собственный вектор для значения λ_n. Тогда $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$ – огреничeнное множество, а значит $\{Ae_n\}_{n=1}^{\infty}$ – предкомпакт.

Однако, в то же время верно неравенство (здесь мы используем ортогональность собственных векторов для теоремы Пифагора, это свойство самосопряжённого оператора):

$$\forall n \neq m : \|Ae_n - Ae_m\|^2 = \|\lambda_n e_n - \lambda_m e_m\|^2 = \lambda_n^2 + \lambda_m^2 > 2\delta_0^2$$

Получили явное противоречие с вполне ограниченностью. □

Утверждение 6.2.1: Если $\lambda \in \sigma(A) \setminus \{0\}$, то $\lambda \in \sigma_{p(A)}$.

Доказательство: По критерию принадлежности спектру, существует нормированная последовательность $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$, для которой есть предел $\lim_{n\to\infty} A_\lambda x_n = 0$.

Так как $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ – ограниченное множество, то в силу компактности A можно выделить сходящуюся последовательность $\lim_{k\to\infty} Ax_{n_k} = y$. Тогда, мы в то же время имеем равенство

$$\lim_{k\to\infty} Ax_{n_k} = \lim_{k\to\infty} \lambda x_{n_k} = y$$

В силу непрерывности оператора A, его можно применить к последнему равенсту:

$$\lim_{k\to\infty} \lambda A x_{n_k} = \lambda y = Ay \Leftrightarrow y \in \text{Ker } A_\lambda$$

Важно отметить, что $y \neq 0$. Это следует из упомянутого предела $\lim \lambda x_{n_k} = y$. Стало быть, $\lambda \in \sigma_{p(A)}$. □

6.3. Теорема Фредгольма для компактных самосопряжённых операторов

Утверждение 6.3.1 (Лемма об инвариантности): Пусть $M \subseteq H$ – подпространство, инвариантное относительно самосопряжённого оператора A (то есть $AM \subseteq M$). Тогда $M^\perp$ тоже инвариантно относительно A.

Доказательство: Пусть $x \in M$. В силу условия, $Ax \in M$. Вопрос состоит в том, чтобы из $y \in M^\perp$ показать верность $Ay \in M^\perp$. Проверим это явно:

$$\forall x \in M : (x, Ay) = (Ax, y) = 0 \Rightarrow Ay \in M^\perp$$

□

Утверждение 6.3.2: Для компактного самосопряжённого оператора верно:

$$[\text{Im } A_\lambda] = \text{Im } A_\lambda$$

Иначе говоря, образ A_λ замкнут.

Доказательство: Применим лемму об инвариантности. Заметим, что $M = \text{Ker } A_\lambda$ инвариантен относительно A и A_λ, а значит и $M^\perp = [\text{Im } A_\lambda]$ инвариантен относительно тех же операторов.

Если мы докажем, что $A_\lambda \mid_{[\text{Im } A_\lambda]}$ является сюръективным оператором, то всё будет доказано.

Действительно, получим тогда $[\text{Im } A_\lambda] = A_{\lambda([\text{Im } A_\lambda])} \subseteq \text{Im } A_\lambda$.

Обозначим $\tilde{A} \coloneqq A|_{[\text{Im } A_\lambda]}$. Это тоже компактный самосопряжённый оператор, действующий из $[\text{Im } A_\lambda]$ в само себя. Заметим, как связаны собственные значения $\tilde{A}$ с исходными:

$$\tilde{A}_\lambda = \tilde{A} - \lambda I = A|_{[\text{Im } A_\lambda]} - \lambda I|_{[\text{Im } A_\lambda]} = (A - \lambda I)|_{[\text{Im } A_\lambda]} = \widetilde{A_\lambda}$$

А как мы знаем из теоремы Фредгольма для самосопряжённых операторов, все собственные вектора лежат в другой части прямого разложения.

Раз так, то $\lambda \notin \{0\} \cup \sigma_p\left(\tilde{A}\right)$. А по одному из свойств СЗ компактного оператора, может быть верно $\lambda \in \rho\left(\tilde{A}\right)$. Значит, оператор $\tilde{A}_\lambda = \widetilde{A_\lambda}$ биективен, что включает в себя его сюръективность. □

Теорема 6.3.1: Пусть H – гильбертово пространство над $\mathbb{C}$, A – компактный самосопряжённый оператор и $\lambda \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$. Тогда

$$H = \text{Im } A_\lambda \oplus \text{Ker } A_\lambda$$

Доказательство: Очевидно из комбинации теоремы Фредгольма для самосопряжённых операторов и утверждения о замкнутости образа компактного самосопряжённого оператора. □

6.4. Теорема Гильберта-Шмидта

Утверждение 6.4.1: Если $A \neq 0$, то у этого оператора существует собственное значение $\lambda \neq 0$.

Доказательство: Коль скоро $A \neq 0$ и мы рассматриваем компактный оператор, то $\|A\| \neq 0$. Коль скоро A – самосопряжённый оператор, то можно воспользоваться теоремой о норме, по ней $\|A\| = \max\big(|m_-|, |m_+|\big)$.

Так как $m_-, m_+ \in \sigma(A)$, то хотя бы одно из этих чисел ненулевое и является собственным значением, что и требовалось. $\square$

Теорема 6.4.1 (Шильберта - Шмидта): Пусть H – сепарабельное гильбертово пространство над полем $\mathbb{C}$, A – компактный самосопряжённый оператор. Тогда в H найдётся ортонормированный базис, состоящий из собственных векторов оператора A.

Доказательство: Построим нужный базис явным образом. Для этого упорядочим все собственные значения оператора A по модулю, причём включим в этот ряд компии этих значений столько раз, сколько соответствует размерности их собственного подпространства (в силу теоремы о конечности размерности собственных подпространств, это возможно). Получим ряд:

$$|\lambda_1| \geq |\lambda_2| \geq |\lambda_3| \geq \ldots$$

Пусть v_n – нормированный собственный вектор, соответствующий λ_n (для равных СЗ берём ортонормированные вектора базиса подпространства).

Образуем ортонормированную систему $\{e_n\}_{n=1}^{\infty}$, полученную перенумерованием вектором v_n и добавлением собственных векторов, соответствующих $\lambda = 0$ (конечно, если оно является СЗ).

Так как мы находимся в сепарабельном пространстве, то для того, чтобы эта система была базисом, достаточно доказать её полноту. Обозначим $M = \big[\langle \{e_n\}_{n=1}^{\infty} \rangle\big]$. Коль скоро это подпространство, можно применить теорему о проекции:

$$M \oplus M^{\perp} = H$$

Стало быть, $M = H \Leftrightarrow M^{\perp} = \{0\}$. Покажем, что $M^{\perp}$ инвариантно относительно A.

В силу самосопряжённости A, достаточно это доказать для просто M (лемма об инвариантности).

Введём дополнительное обозначение $L \coloneqq \langle \{e_n\}_{n=1}^{\infty} \rangle$. Тогда $AL \subseteq L$ тривиальным образом. При этом оператор A компактен, а значит непрерывен, то есть

$$AM = A([L]) \subseteq [AL] \subseteq [L] = M$$

Исследуем $\tilde{A} \coloneqq A|_{M^{\perp}}$. Возможно 2 случая:

- $\tilde{A} = 0$. Этот факт можно записать следующим образом:

$$\forall x \in M^{\perp}: \ \tilde{A}x = 0 \Rightarrow x \in \operatorname{Ker} \tilde{A}$$

Стало быть, $M^\perp \subseteq \text{Ker } \tilde{A}$. Но так как мы рассмотрели сужение на $M^\perp$, то по определению M мы оставили $\text{Ker } A \setminus \{0\}$ за бортом, то есть $\text{Ker } \tilde{A} = \{0\} = M^\perp$.

- $\tilde{A} \neq 0$. Предположим противное: $M^\perp \neq \{0\}$.

  По доказанной выше лемме, у $\tilde{A}$ существует ненулевое СЗ λ. Обозначим за e – соответствующий нормированный собственный вектор, то есть $\tilde{A}e = \lambda e$, но ведь тогда и $Ae = \lambda e$. Получили противоречие с определением M.

□