

Содержание

1	Собственные значения и собственные векторы	2
2	Проекторы и прямые суммы подпространств	6
3	Инвариантные подпространства. Разложение операторов	8
4	Многочлены от операторов и матриц	12
5	Теорема Гамильтона-Кэли	15
6	Многочлены от операторов и разложение операторов	16
7	TODO: Жорданов базис для нильпотентных операторов	21
8	TODO: Жорданов базис и жорданова форма линейных операторов	21
9	Сопряжённые операторы	21
10	Самосопряжённые операторы в вещественных пространствах	31

§1. Собственные значения и собственные векторы

Далее X — конечномерное линейное пространство размерности n , $L(X)$ — алгебра операторов, I — тождественный оператор, O — нулевой оператор.

Определение 1.1. Оператор A называется *скалярным*, если он имеет вид $A = \alpha I$, $\alpha \in \mathbb{K}$.

Определение 1.2. Скажем, что оператор $A \in L(X)$ имеет *простую структуру* (оператор простой структуры, ОПС, *диагонализируемый* оператор), если существует базис e_1, \dots, e_n в X и такие числа $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$, что имеют место равенства:

$$Ae_k = \lambda_k e_k, \quad k = \overline{1, n}$$

Иначе говоря, для того чтобы A был оператором простой структуры, необходимо и достаточно, чтобы существовал базис, в котором матрица оператора имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

Очевидно, что оператор простой структуры обратим тогда и только тогда, когда $\forall k = \overline{1, n} \quad \lambda_k \neq 0$, причем обратный оператор будет иметь вид

$$A^{-1}e_k = \frac{1}{\lambda_k} e_k, \quad k = \overline{1, n}$$

Всякий оператор скалярного типа является оператором простой структуры.

Существуют операторы, не являющиеся ОПС.

Определение 1.3. Ненулевой оператор $Q \in L(X)$ называется *нильпотентным*, если $\exists m \in \mathbb{N} \quad Q^m = O$. Наименьшее из m , для которых выполняется данное равенство, называется *индексом nilьпотентности* оператора Q .

Пример 1.1.

$$\begin{aligned} D : \mathcal{P}_n(\mathbb{K}) &\rightarrow \mathcal{P}_n(\mathbb{K}) \\ D\varphi &= \varphi' \\ D^{n+1} &= O \end{aligned}$$

$n + 1$ — индекс nilьпотентности

◇

Теорема 1.1. *Если оператор нильпотентный, то он не диагонализируем*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $Q \in L(X)$, $Q \neq 0$, $Q^m = 0$.

Предположим противное: допустим, что Q — оператор простой структуры. Тогда существует базис e_1, \dots, e_n в X и такие числа $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{K}$, что

$$Qe_k = \lambda_k e_k, \quad k = \overline{1, n}$$

λ_k не равны одновременно нулю (в противном случае Q был бы нулевым).

$$\forall k = \overline{1, n} \quad 0 = Q^m e_k = \lambda_k^m e_k \Rightarrow \exists k = \overline{1, n} \quad e_k = 0$$

Получили противоречие (в базисе не может быть нулевых векторов). \square

Определение 1.4. $\lambda_0 \in \mathbb{K}$ называется *собственным значением* оператора $A \in L(X)$, если существует **ненулевой** вектор $x_0 \in X$ такой, что

$$Ax_0 = \lambda_0 x_0$$

При этом x_0 называется *собственным вектором* оператора A , соответствующим λ_0 .

Непосредственно из определения 1.4 следует, что λ_k из определения 1.2 являются собственными значениями оператора A , а e_k — собственными векторами.

Определение 1.5. Совокупность всех собственных значений оператора A называется *спектром* оператора:

$$\sigma(A) = \{\lambda \in \mathbb{K} : \exists x_0 \in X \quad x_0 \neq 0 \wedge Ax_0 = \lambda x_0\}$$

Рассмотрим равенство

$$\begin{aligned} Ax_0 &= \lambda_0 x_0 \\ (A - \lambda_0 I)x_0 &= 0 \end{aligned}$$

Если $\text{Ker}(A - \lambda_0 I) \neq \{0\}$, то λ_0 — собственное значение A . Значит, можно сказать, что

Спектр оператора — множество тех $\lambda_0 \in \mathbb{K}$, для которых оператор $A - \lambda_0 I$ необратим.

Оператор $A - \lambda_0 I$ необратим тогда и только тогда, когда

$$\det(A - \lambda_0 I) = 0 \tag{1.1}$$

Пусть $\mathcal{A} = (a_{ij}) \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$ — матрица оператора A . Исходя из условия (1.1), λ является собственным значением оператора A

тогда и только тогда, когда матрица $\mathcal{A} - \lambda E$ необратима, т. е. её определитель равен нулю:

$$\det(a_{ij} - \lambda \delta_{ij}) = 0$$

$$p_A(\lambda) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

$$p_A(\lambda) = (-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} (a_{11} + \dots + a_{nn}) \lambda^{n-1} + \dots + \det \mathcal{A} \quad (1.3)$$

Определение 1.6. Выражение вида (1.2) называется *характеристическим многочленом* оператора A (матрицы \mathcal{A}).

Из вышеприведённых рассуждений следует

Теорема 1.2. *Спектр оператора состоит из корней характеристического многочлена:*

$$\sigma(A) = \{\lambda \in \mathbb{K} : p_A(\lambda) = 0\}$$

Следовательно, спектр линейного оператора в конечномерном линейном пространстве всегда содержит не более n собственных значений.

Пример 1.2. Рассмотрим \mathbb{R}^2 и оператор $A \in L(\mathbb{R}^2)$ с матрицей \mathcal{A} :

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad A(x_1, x_2) = (x_2, -x_1)$$

$$\det \begin{pmatrix} -\lambda & 1 \\ -1 & -\lambda \end{pmatrix} = \lambda^2 + 1 = 0$$

Вещественных корней нет, значит

$$\sigma(A) = \emptyset \quad \diamond$$

Теорема 1.3. *Пусть X — комплексное ЛП, $\dim X \geq 1$. Тогда каждый $A \in L(X)$ имеет непустой спектр, состоящий из конечного числа собственных значений, число которых не превышает n , и все они совпадают с корнями $p_A(\lambda)$.*

Доказательство теоремы следует из приведённых выше рассуждений и основной теоремы высшей алгебры.

Определение 1.7. *След квадратной матрицы есть сумма эле-*

ментов матрицы, стоящих на главной диагонали.

$$\operatorname{tr} \mathcal{A} = \sum_{i=1}^n a_{ii}$$

Аналогично определяется след оператора (можно показать, что подобные матрицы имеют одинаковый след).

Из формул Виета и выражения (1.3) получаем

$$\begin{aligned}\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n &= a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn} = \operatorname{tr} A \\ \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n &= \det \mathcal{A} = \det A\end{aligned}$$

Определение 1.8. Ядро оператора $A - \lambda_0 I$ называется *собственным подпространством* оператора A для собственного значения λ_0 .

$$E(\lambda_0, A) = \operatorname{Ker}(A - \lambda_0 I)$$

Определение 1.9. Кратность корня λ_0 характеристического многочлена оператора A называется *алгебраической кратностью* собственного значения λ_0 .

Определение 1.10. Собственное значение линейного оператора называется *простым*, если его алгебраическая кратность равна единице.

Определение 1.11. $\dim E(\lambda_0, A)$ называется *геометрической кратностью* собственного значения λ_0 .

Теорема 1.4. Пусть $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{K}$ — различные собственные значения оператора $A \in L(X)$. Тогда соответствующие им собственные векторы e_1, \dots, e_m линейно независимы.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Доказательство проведём индукцией по m .

База индукции: при $m = 1$ утверждение теоремы очевидно.

Индукционный переход: пусть утверждение верно для k векторов. e_1, \dots, e_k — линейно независимы. Добавим к ним вектор e_{k+1} .

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{k+1} \alpha_j e_j &= 0 \Rightarrow (A - \lambda_{k+1} I) \left(\sum_{j=1}^{k+1} \alpha_j e_j \right) = 0 \\ \sum_{j=1}^k (\lambda_j - \lambda_{k+1}) \alpha_j e_j &= 0 \Rightarrow \alpha_j = 0, \quad j = \overline{1, k} \\ \alpha_{k+1} e_{k+1} &= 0 \Rightarrow \alpha_{k+1} = 0, \text{ т.к. } e_{k+1} \neq 0\end{aligned}$$

□

Из определения 1.2 и теоремы 1.4 следует

Теорема 1.5. Если характеристический многочлен оператора

имеет n различных корней и размерность пространства равна n , то этот оператор диагонализуем.

§2. Проекторы и прямые суммы подпространств

Далее

$$\dim X = n$$

$$X = X_1 \oplus X_2 \oplus \cdots \oplus X_m$$

Определение 2.1. Оператор $P \in L(X)$ называется *проектором*, если

$$P^2 = P$$

Матрица $\mathcal{P} \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$ называется *идемпотентной*, если

$$\mathcal{P}^2 = \mathcal{P}$$

Определение 2.2. Пусть P_k , $k = \overline{1, m}$ — проекторы. Будем говорить, что они образуют *разложение единицы*, если

1. $I = \sum_{k=1}^m P_k$
2. $P_i P_j = O \quad \forall i \neq j$

Пусть далее $m = 2$ (аналогично можно рассмотреть случай произвольного m).

$$X = X_1 \oplus X_2$$

$$x = x_1 + x_2$$

Построим операторы P_1 и P_2 следующим образом:

$$P_1 x = x_1$$

$$P_2 x = x_2$$

Линейность очевидна. Ясно, что построенные операторы являются проекторами.

Лемма 2.1. Построенные указанным выше образом проекторы образуют разложение единицы:

1. $P_1 + P_2 = I$
2. $P_1 P_2 = P_2 P_1 = O$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

1. $(P_1 + P_2)x = P_1 x + P_2 x = x_1 + x_2 = x = Ix$

$$2. (P_1 P_2)x = P_1(P_2 x) = P_1 x_2 = P_1(0 + x_2) = 0 \quad \square$$

Лемма 2.2. Пусть задано разложение единицы

$$\begin{cases} I = P_1 + P_2 \\ P_1 P_2 = O \end{cases}$$

Тогда

$$X = X_1 \oplus X_2,$$

где

$$\begin{aligned} X_1 &= \text{Im } P_1 \\ X_2 &= \text{Im } P_2 \end{aligned}$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $x \in X$. Ясно, что его можно представить как сумму $x = x_1 + x_2$, где $x_1 \in X_1$ и $x_2 \in X_2$:

$$\begin{aligned} P_1 x &= x_1 \in \text{Im } P_1 = X_1 \\ P_2 x &= x_2 \in \text{Im } P_2 = X_2 \\ Ix &= P_1 x + P_2 x = x_1 + x_2 \end{aligned}$$

Покажем, что такое представление единственно. Пусть

$$x = x'_1 + x'_2, \quad x'_i \in X_i, \quad i = 1, 2 \quad (2.1)$$

Можно показать, что $P_1 x'_1 = x'^1_1$ и $P_1 x'_2 = 0$ ²

Применим к обеим частям равенства (2.1) оператор P_1 :

$$P_1 x = P_1 x'_1 + P_1 x'_2 = x_1$$

Применим к обеим частям того же равенства (2.1) оператор P_2 :

$$P_2 x = P_2 x'_1 + P_2 x'_2 = x_2$$

Таким образом, объединяя полученные равенства, получаем:

$$\begin{aligned} P_1 x &= x_1 = x'_1 \\ P_2 x &= x_2 = x'_2 \end{aligned} \quad \square$$

1

$$\begin{aligned} x'_1 \in \text{Im } P_1 &\Rightarrow \exists x_0 \in X \quad P_1 x_0 = x'_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow P_1^2 x_0 = P_1 x'_1 \Rightarrow P_1 x_0 = P_1 x'_1 \Rightarrow x'_1 = P_1 x'_1 \end{aligned}$$

2

$$P_1 x'_2 = P_1(P_2 x_0) = 0$$

Пусть $P \in L(X)$ — проектор. Рассмотрим оператор вида $I - P$. Покажем, что он является проектором:

$$(I - P)^2 = I - 2P + P^2 = I - 2P + P = I - P$$

Покажем, что проекторы $I - P$ и P образуют разложение единицы:

$$\begin{aligned}(I - P)P &= P - P^2 = 0 \\ (I - P) + P &= I\end{aligned}$$

Проектор $I - P$ называется *дополнительным проектором* к P . Из леммы 2.2 следует, что

$$X = \operatorname{Im} P \oplus \operatorname{Im}(I - P)$$

§3. Инвариантные подпространства. Разложение операторов

Далее $A \in L(X)$.

Определение 3.1. Подпространство $M \subset X$ называется *инвариантным* для A , если

$$A(M) \subset M$$

Иначе:

$$\forall x \in M \quad Ax \in M$$

Далее сужение оператора A на инвариантное подпространство M будем обозначать A_M или $A|_M$.

Теорема 3.1. Пусть X — комплексное пространство размерности больше единицы. Тогда для любого оператора $A \in L(X)$ имеется инвариантное подпространство ненулевой размерности.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $A \in L(X)$. Так как пространство комплексное, спектр оператора A непуст, т.е. имеется хотя бы одно собственное значение λ_1 :

$$Ae_1 = \lambda_1 e_1$$

Рассмотрим множество

$$M = \{\alpha e_1 : \alpha \in \mathbb{C}\}$$

Это инвариантное подпространство, т. к.

$$A(\alpha e_1) = \alpha \lambda_1 e_1 \in M$$

□

Замечание 3.1. В вещественном пространстве может и не быть инвариантных подпространств.

Пример 3.1.

$$A : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

$$Ae_1 = e_2$$

$$Ae_2 = -e_1$$

◇

TODO: свойства матриц

Определение 3.2. Пусть $X = X_1 \oplus \cdots \oplus X_m$ — прямая сумма инвариантных относительно A подпространств X_k , $k = \overline{1, m}$. В этом случае говорят, что A приводится (разлагается) семейством подпространств X_k в прямую сумму операторов:

$$A = A_1 \oplus \cdots \oplus A_m,$$

где $A_k = A|X_k$.

Такое обозначение обусловлено тем, что любой вектор Ax можно единственным образом представить в виде суммы:

$$Ax = A(x_1 + \cdots + x_m) = Ax_1 + \cdots + Ax_m = A_1x_1 + \cdots + A_mx_m$$

Теорема 3.2. Пусть $A \in L(X)$ — оператор простой структуры, $\sigma(A) = \{\lambda_i\}_{i=1}^m$, $m \leq n$. Тогда $X = \bigoplus_{k=1}^m X_k$, где $X_k = E(\lambda_k, A) = \text{Ker}(A - \lambda_k I)$ и оператор A допускает разложение

$$A = \lambda_1 I_1 \oplus \cdots \oplus \lambda_m I_m$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Нетрудно показать, что любое собственное подпространство оператора является инвариантным относительно этого оператора.

Покажем, что $X = \bigoplus_{k=1}^m X_k$.

По определению оператора простой структуры существует базис e_1, \dots, e_n в X такой, что $Ae_k = \lambda_i e_k$. Каждый из этих векторов принадлежит одному из подпространств X_i . Таким образом каждый вектор $x \in X$ можно представить в виде суммы некоторых векторов из X_k , $k = \overline{1, m}$, причем такое представление единственно в силу свойств базиса.

Ясно также, что сужение оператора A на инвариантное подпространство $E(\lambda_k, A)$ будет иметь вид:

$$A_k = A|E(\lambda_k, A) = \lambda_k I_k$$

где $I_k \in L(X_k)$ — тождественный оператор. \square

Теорема 3.3. Пусть $A \in L(X)$ допускает разложение $A = A_1 \oplus \cdots \oplus A_m$ относительно прямой суммы инвариантных подпространств $X = X_1 \oplus \cdots \oplus X_m$. Тогда

$$1. \quad \text{Ker } A = \text{Ker } A_1 \oplus \cdots \oplus \text{Ker } A_m$$

$$\text{Im } A = \text{Im } A_1 \oplus \cdots \oplus \text{Im } A_m$$

$$2. \quad \text{Ker}(A - \lambda I) = \bigoplus_{k=1}^m \text{Ker}(A_k - \lambda I_k) \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}$$

$$\text{Im}(A - \lambda I) = \bigoplus_{k=1}^m \text{Im}(A_k - \lambda I_k) \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}$$

3. A обратим тогда и только тогда, когда обратима каждая его часть A_k .

$$4. \quad \sigma(A) = \bigcup_{k=1}^m \sigma(A_k)$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

1. Пусть $x \in \text{Ker } A$, $x = x_1 + \cdots + x_m$. Тогда

$$0 = Ax = A_1x_1 + \cdots + A_mx_m, \quad A_kx_k \in X_k, \quad k = \overline{1, m}$$

Из свойств прямой суммы (единственности представления нуля) получаем, что $A_kx_k = 0$, $k = \overline{1, m}$, т.е. $x_k \in \text{Ker } A_k$. Отсюда и получаем первое равенство.

Пусть $y \in \text{Im } A$. Тогда существует $x \in X$, $x = x_1 + \cdots + x_m$ такой, что $y = Ax$.

$$\text{Im } A \ni y = Ax = A_1x_1 + \cdots + A_mx_m, \quad A_kx_k \in \text{Im } A_k, \quad k = \overline{1, m}$$

2. Рассмотрим скалярный оператор λI :

$$\lambda I = \lambda I_1 \oplus \cdots \oplus \lambda I_m$$

относительно X_1, \dots, X_m . Следовательно

$$A - \lambda I = (A_1 - \lambda I_1) \oplus \cdots \oplus (A_m - \lambda I_m)$$

Далее, применяя (1) для оператора $A - \lambda I$ получаем равенства (2).

3. Оператор A обратим тогда и только тогда, когда $\text{Кег } A = \{0\}$. Отсюда и из свойства (1), очевидно, следует утверждение (3) теоремы.

Пусть A обратим. Рассмотрим оператор B такой, что

$$B = A_1^{-1} \oplus \dots \oplus A_m^{-1}$$

$$Bx = A_1^{-1}x_1 + \dots + A_m^{-1}x_m$$

Покажем, что оператор B — обратный к оператору A :

$$A(Bx) = A(A_1^{-1}x_1 + \dots + A_m^{-1}x_m) = x_1 + \dots + x_m = x$$

т.к. $A_k^{-1}x_k \in X_k$

Таким образом

$$A^{-1} = A_1^{-1} \oplus \dots \oplus A_m^{-1}$$

4. Рассмотрим прямую сумму операторов

$$A - \lambda I = (A_1 - \lambda I_1) \oplus \dots \oplus (A_m - \lambda I_m)$$

$\lambda \in \sigma(A) \Leftrightarrow A - \lambda I$ необратим \Leftrightarrow необратим хотя бы один из $A_k - \lambda I_k$, т. е.

$$\sigma(A) = \sigma(A_1) \cup \dots \cup \sigma(A_m) \quad \square$$

Теорема 3.4. Пусть $A \in L(X)$, $X = X_1 \oplus \dots \oplus X_m$, проекторы P_1, \dots, P_m образуют разложение единицы, причем $\text{Im } P_k = X_k$. Тогда для того чтобы каждое из подпространств X_k было инвариантным относительно A , необходимо и достаточно, чтобы каждый из операторов P_k был перестановочен с A :

$$AP_k = P_kA, \quad k = \overline{1, m}$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Необходимость: Пусть $A(X_k) \subset X_k$, $k = \overline{1, m}$.

$$\begin{aligned} AP_kx &= IAP_kx = (P_1 + \dots + P_k + \dots + P_m)AP_kx = \\ &= P_kAP_kx = P_kAP_k(x_1 + \dots + x_k + \dots + x_m) = P_kAP_kx_k = \\ &= P_kAx_k = \underbrace{P_kAx_1}_{=0} + \dots + P_kAx_k + \dots + \underbrace{P_kAx_m}_{=0} = P_kAx \end{aligned}$$

Необходимость доказана.

Достаточность: Пусть $x \in X_k$.

$$Ax = AP_kx = P_kAx \in \text{Im } P_k = X_k \quad \square$$

Теорема 3.5. Пусть $A \in L(X)$ — оператор простой структуры, $\sigma(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$. Тогда

$$A = \sum_{k=1}^m \lambda_k P_k, \quad (3.1)$$

где P_k — проекторы, образующие разложение единицы, $\text{Im } P_k = E(\lambda_k, A)$.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $x \in X$. По теореме 3.2

$$X = X_1 \oplus \dots \oplus X_m, \quad X_k = E(\lambda_k, A), \quad k = \overline{1, m}$$

Тогда

$$x = x_1 + \dots + x_m = P_1x + \dots + P_mx, \quad P_kx \in X_k$$

Применим к правой и левой частям равенства оператор A :

$$\begin{aligned} Ax &= AP_1x + \dots + AP_mx = \\ &= \lambda_1 P_1x + \dots + \lambda_m P_mx = \left(\sum_{k=1}^m \lambda_k P_k \right) x \quad \square \end{aligned}$$

Определение 3.3. Представление (3.1) называется *спектральным разложением* оператора простой структуры.

Следствие 1. Если $\mathcal{A} \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$ диагонализируема, $\sigma(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$, то

$$\mathcal{A} = \sum_{k=1}^m \lambda_k \mathcal{P}_k,$$

$$\text{где } \mathcal{P}_k^2 = \mathcal{P}_k, \quad E = \sum_{k=1}^m \mathcal{P}_k, \quad \mathcal{P}_i \mathcal{P}_j = 0 \quad \forall i \neq j$$

§4. Многочлены от операторов и матриц

Далее будем рассматривать алгебры линейных операторов, матриц и многочленов.

Пусть $A \in L(X)$, $p \in \mathcal{P}(\mathbb{K})$.

$$p(z) = p_0 + p_1 z + \cdots + p_m z^m$$

Поставим p в соответствие такой оператор $p(A)$, что

$$p(A) = p_0 I + p_1 A + \cdots + p_m A^m$$

Определение 4.1. Оператор $p(A)$ называется *многочленом от оператора A* .

Рассмотрим отображение $\Phi_A : \mathcal{P}(\mathbb{K}) \rightarrow L(X)$ такое что

$$\Phi_A(p) = p(A) \quad (4.1)$$

Лемма 4.1. *Отображение (4.1) — гомоморфизм алгебр:*

1. $\Phi_A(\mathbb{1}) = I$, где $\mathbb{1}(z) \equiv 1$
2. $\Phi_A(\alpha f + \beta g) = \alpha \Phi_A(f) + \beta \Phi_A(g)$
3. $\Phi_A(fg) = \Phi_A(f)\Phi_A(g)$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Утверждения (1) и (2) очевидны. Докажем утверждение (3).

$$\begin{aligned}
 3. \quad & f(z) = f_0 + f_1 z + \cdots + f_m z^m \\
 & g(z) = g_0 + g_1 z + \cdots + g_k z^k \\
 & (fg)(z) = \sum_{i=0}^{m+k} c_i z^i, \quad c_i = \sum_{j+p=i} f_j g_p \\
 & \Phi_A(fg) = \sum_{i=0}^{m+k} c_i A^i \\
 & \Phi_A(f)\Phi_A(g) = f(A)g(A) = (f_0 I + f_1 A + \cdots + f_m A^m) \times \\
 & \quad \times (g_0 I + g_1 A + \cdots + g_k A^k) = \sum_{i=0}^{m+k} c_i A^i, \quad c_i = \sum_{j+p=i} f_j g_p \\
 & \Phi_A(fg) = \Phi_A(f)\Phi_A(g) \quad \square
 \end{aligned}$$

Следствие 1. $f(A)g(A) = g(A)f(A)$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

$$\Phi_A(f)\Phi_A(g) = \Phi_A(fg) = \Phi_A(gf) = \Phi_A(g)\Phi_A(f) \quad \square$$

Аналогично можно рассмотреть многочлены от матриц (и вообще элементов любой унитарной алгебры).

Несложно заметить, что многочлен $p(\mathcal{A})$ от матрицы \mathcal{A} оператора A есть матрица многочлена $p(A)$ от оператора A .

Рассмотрим оператор $A \in L(X)$ такой, что

$$\begin{aligned} I &= I_1 \oplus \cdots \oplus I_m \\ A &= A_1 \oplus \cdots \oplus A_m \end{aligned}$$

относительно

$$X = X_1 \oplus \cdots \oplus X_m$$

Очевидно, что если X_k инвариантно относительно A , то оно инвариантно также относительно A^j , $j \geq 0$. Также ясно, что если A_k — сужение оператора A на инвариантное подпространство X_k , то A_k^j — сужение оператора A^j на то же подпространство. Отсюда получаем, что

$$A^j = A_1^j \oplus \cdots \oplus A_m^j$$

Пусть далее A — оператор простой структуры, $f \in \mathcal{P}(\mathbb{K})$.

$$\begin{aligned} A &= \sum_{j=1}^m \lambda_j P_j \\ A^k &= \sum_{j=1}^m \lambda_j^k P_j \\ f(A) &= \sum_{j=1}^m f(\lambda_j) P_j \end{aligned}$$

Последние два равенства доказываются простой проверкой.

Наша цель — получить из последнего равенства проекторы P_j . Этого можно добиться, если найти такие многочлены f_j , что

$$\begin{cases} f_j(\lambda_j) = 1 \\ f_j(\lambda_k) = 0, \quad k \neq j \end{cases}$$

Тогда $f_j(A) = P_j$.

Используем интерполяционную формулу Лагранжа:

$$f_j(\lambda) = \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^m \frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda_j - \lambda_i}$$

$$A = \sum_{j=1}^m \lambda_j P_j = \sum_{j=1}^m \lambda_j f_j(A) = \sum_{j=1}^m \lambda_j \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^m \frac{A - \lambda_i}{\lambda_j - \lambda_i} \quad (4.2)$$

Формула (4.2) называется *интерполяционной формулой Сильвестра*.

§5. Теорема Гамильтона-Кэли

Определение 5.1. Ненулевой многочлен $p \in \mathcal{P}(\mathbb{K})$ называется *аннулирующим* оператор $A \in L(X)$ (матрицу $\mathcal{A} \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$), если $p(A) = O$ ($p(\mathcal{A}) = 0$).

Определение 5.2. Многочлен p наименьшей положительной степени со старшим коэффициентом 1 и аннулирующий оператор A называется *минимальным (аннулирующим) многочленом* оператора A .

Рассмотрим без доказательства следующую важную теорему.

Теорема 5.1 (Гамильтона-Кэли). Пусть X — линейное пространство над полем комплексных чисел. Тогда характеристический многочлен оператора $A \in L(X)$ аннулирует оператор A .

$$p_A(A) = O$$

Лемма 5.1. Минимальный многочлен единственен.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Предположим противное. Пусть f и g — минимальные многочлены оператора A :

$$f(A) = g(A) = O$$

Тогда

$$(f - g)(A) = O$$

То есть многочлен $f - g$ также аннулирующий, причем его степень меньше степени f и g . Получили противоречие минимальности f и g . \square

Следствие 1 (из теоремы 5.1). Пусть $A \in L(X)$, $\sigma(A) = \{\lambda_0\}$. Тогда

$$A = \lambda_0 I + Q,$$

где Q — нильпотентный либо нулевой оператор и $Q^n = O$, $n = \dim X$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Характеристический многочлен для оператора A имеет вид

$$p_A(\lambda) = (-1)^n (\lambda - \lambda_0)^n$$

Тогда по теореме Гамильтона-Кэли получаем

$$O = p_A(A) = (A - \lambda_0 I)^n$$

Таким образом оператор $A - \lambda_0 I = Q$ — нильпотентный и

$$A = \lambda_0 I + Q \quad \square$$

§6. Многочлены от операторов и разложение операторов

Лемма 6.1. *Любой необратимый оператор $A \in L(X)$ представим в виде прямой суммы нильпотентного (нулевого) и обратимого операторов относительно некоторого разложения в прямую сумму инвариантных подпространств.*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Имеют место включения:

$$\begin{aligned} \{0\} &\neq \text{Ker } A \subset \text{Ker } A^2 \subset \dots \\ X &\supset \text{Im } A \supset \text{Im } A^2 \supset \dots \end{aligned}$$

В силу конечномерности пространства³ существует такое $k \in \mathbb{N}$, что $\text{Ker } A^k = \text{Ker } A^{k+1}$.

Покажем, что $\forall j \geq k+1 \text{ Ker } A^k = \text{Ker } A^j$.

Пусть k — наименьшее натуральное число, для которого выполнено условие $\text{Ker } A^k = \text{Ker } A^{k+1}$. Докажем, что $\text{Ker } A^{k+2} = \text{Ker } A^k$. Пусть $x \in \text{Ker } A^{k+2}$.

$$\begin{aligned} x \in \text{Ker } A^{k+2} &\Rightarrow A^{k+2}x = 0 \Rightarrow A^{k+1}(Ax) = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow Ax \in \text{Ker } A^{k+1} = \text{Ker } A^k \Rightarrow A^k(Ax) = 0 \Rightarrow A^{k+1}x = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow x \in \text{Ker } A^{k+1} = \text{Ker } A^k \end{aligned}$$

В силу теоремы о ранге и дефекте оператора,

$$\dim X = \dim \text{Ker } A^j + \dim \text{Im } A^j$$

И тогда, если $j \geq k$, то не только $\text{Ker } A^j = \text{Ker } A^k$, но и $\text{Im } A^j = \text{Im } A^k$.

Пусть $X_0 = \text{Ker } A^k$, $X_1 = \text{Im } A^k$. Нетрудно показать, что это инвариантные относительно A подпространства.

³Если M , N — подпространства из X , то условия $M \neq N$ и $M \subset N$ влекут за собой, что $\dim M < \dim N$

Докажем, что $X = X_0 \oplus X_1$. Из теоремы о ранге и дефекте

$$\dim X_0 + \dim X_1 = \dim X$$

Осталось показать, что $X_0 \cap X_1 = \{0\}$.

$$\begin{aligned} y \in X_0 \cap X_1 &\Rightarrow (A^k y = 0) \wedge (\exists x \in X \ y = A^k x) \Rightarrow \\ &\Rightarrow A^k y = A^{2k} x \Rightarrow A^{2k} x = 0 \Rightarrow x \in \text{Ker } A^{2k} = \text{Ker } A^k \Rightarrow \\ &\Rightarrow A^k x = 0 \Rightarrow y = 0 \end{aligned}$$

Таким образом $A = A_0 \oplus A_1$ относительно $X = X_0 \oplus X_1$.

$\text{Ker } A_1 = \{0\}$, т. к. все векторы из ядра A лежат в X_0 , значит A_1 обратим.

$\forall x \in X_0 \ A_0^k x = A^k x = 0$ — то есть A нильпотентный либо нулевой. \square

Лемма 6.2. *Многочлен $g \in \mathcal{P}(\mathbb{K})$ аннулирует $A \in L(X)$ тогда и только тогда, когда g делится на минимальный многочлен p_0 оператора A .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Необходимость.

Пусть $g(A) = O$, $g = fp_0 + r$, $\deg r < \deg p_0$.

$$O = g(A) = f(A)p_0(A) + r(A) = r(A)$$

То есть $r(A) = O$, при этом степень r меньше степени минимального многочлена. Значит, $r = 0$.

Достаточность.

Если $g = fp_0$, то $g(A) = f(A)p_0(A) = O$. \square

Лемма 6.3. *Если $p \in \mathcal{P}(\mathbb{C})$ — минимальный многочлен для оператора A , то $\sigma(A)$ совпадает с множеством корней многочлена p .*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

1. Пусть $\lambda_0 \in \sigma(A)$, $p(z) = p_0 + p_1 z + \dots + p_k z^k$. Тогда есть такой ненулевой вектор x_0 , что $Ax_0 = \lambda_0 x_0$.

$$p(A)x_0 = p_0 x_0 + p_1 \lambda_0 x_0 + p_2 \lambda_0^2 x_0 + \dots + p_k \lambda_0^k x_0 = p(\lambda_0)x_0$$

Таким образом

$$0 = p(A)x_0 = p(\lambda_0)x_0 \Rightarrow p(\lambda_0) = 0$$

2. Пусть $\mu_0 \in \mathbb{C}$ — корень p :

$$p(\mu_0) = 0$$

Предположим противное: $\mu_0 \notin \sigma(A)$. Это значит, что оператор $A - \mu_0 I$ обратим.

Рассмотрим многочлен $g(\lambda) = \frac{p(\lambda)}{\lambda - \mu_0}$.

$$p(\lambda) = g(\lambda)(\lambda - \mu_0)$$

$$p(A) = g(A)(A - \mu_0 I)$$

$$g(A) = p(A)(A - \mu_0 I)^{-1}$$

$$g(A) = O$$

Таким образом получили, что g — аннулирующий (ненулевой) многочлен, $\deg g < \deg p$, что противоречит минимальности p . \square

Следствие 1. $\sigma(A)$ содержится в множестве корней любого аннулирующего многочлена оператора A .

Теорема 6.1 (о разложении оператора). Пусть $A \in L(X)$, X — комплексное линейное пространство, $\sigma(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$, k_i — алгебраическая кратность собственного значения λ_i , $i = \overline{1, m}$. Тогда оператор A допускает разложение в прямую сумму операторов

$$A = \bigoplus_{k=1}^m A_k \tag{6.1}$$

относительно инвариантных подпространств X_1, \dots, X_m :

$$X = \bigoplus_{k=1}^m X_k$$

При этом справедливы следующие утверждения:

$$1. \sigma(A_j) = \{\lambda_j\}, \quad j = \overline{1, m}$$

$$2. \dim X_j = k_j, \quad j = \overline{1, m}$$

3. $A_j = \lambda_j I_j + Q_j$, где Q_j — нильпотентный (либо нулевой) оператор с индексом нильпотентности $k_j^0 \leq k_j$, k_j^0 — кратность корня λ_j в минимальном многочлене оператора A .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Рассмотрим оператор $A - \lambda_j I$, $\lambda_j \in \sigma(A)$. Он необратим, значит к нему применима лемма 6.1, то есть существует такое разложение $X = X_j \oplus X'_j$ (X_j и X'_j инвариантны относительно $A - \lambda_j I$), что сужение этого оператора на X_j нильпотентно (индекс нильпотентности обозначим m_j), а на X'_j — обратимо.

Несложно показать⁴, что X_j и X'_j являются инвариантными подпространствами и для оператора A . Тогда можно рассмотреть прямую сумму

$$A = A_j \oplus A'_j,$$

где $A_j = A|X_j$, $A'_j = A|X'_j$.

Рассмотрим оператор A_j . $\lambda_j \in \sigma(A_j)$, поскольку $A_j - \lambda_j I_j$ — сужение оператора $A - \lambda_j I$ на X_j , которое нильпотентно, а значит необратимо.

Покажем, что никаких других точек спектра оператор A_j не имеет. Пусть $\lambda_0 \in \sigma(A_j)$. Тогда существует ненулевой вектор $x \in X_j$, что

$$\begin{aligned} A_j x &= \lambda_0 x \\ A_j x - \lambda_j x &= \lambda_0 x - \lambda_j x \\ (A_j - \lambda_j I_j) x &= (\lambda_0 - \lambda_j) x \\ (A_j - \lambda_j I_j)^2 x &= (\lambda_0 - \lambda_j)^2 x \\ &\dots\dots\dots \\ 0 &= (A_j - \lambda_j I_j)^{m_j} = (\lambda_0 - \lambda_j)^{m_j} x \\ (\lambda_0 - \lambda_j)^{m_j} x &= 0 \\ \lambda_0 &= \lambda_j \end{aligned}$$

где m_j — индекс нильпотентности $A_j - \lambda_j I_j$. Таким образом $\sigma(A_j) = \{\lambda_j\}$.

Ясно, что $\lambda_j \notin \sigma(A'_j)$, поскольку $A'_j - \lambda_j I'_j$ — сужение $A - \lambda_j I$ на X'_j — обратимо.

По пункту (4) теоремы 3.3, $\sigma(A) = \sigma(A_j) \cup \sigma(A'_j)$, значит

$$\sigma(A'_j) = \sigma(A) \setminus \{\lambda_j\}$$

Значит, повторяя аналогичный процесс для подпространства X'_j и оператора A'_j , за конечное число шагов (а именно за $m - 1$) мы сможем получить разложение (6.1), где каждый из операторов будет иметь одноточечный спектр.

Первое утверждение теоремы доказано.

⁴ $x \in X_j \Rightarrow (A - \lambda_j I)x = Ax - \lambda_j x \in X_j \Rightarrow Ax \in X_j$

Теперь докажем второе утверждение теоремы. Так как $A = A_1 \oplus \dots \oplus A_m$, то $p_A(\lambda) = p_{A_1}(\lambda) \dots p_{A_m}(\lambda)$, где p_A — характеристический многочлен A , p_{A_j} — характеристический многочлен A_j . Кроме того известно, что $p_A(\lambda) = (-1)^n \prod_{j=1}^m (\lambda - \lambda_j)^{k_j}$, и $\sigma(A_j) = \{\lambda_j\}$, $j = \overline{1, m}$.

Значит

$$p_{A_j}(\lambda) = (-1)^{k_j} (\lambda - \lambda_j)^{k_j}, \quad j = \overline{1, m}$$

Отсюда следует, что $\dim X_j = k_j$, $j = \overline{1, m}$.

Второе утверждение теоремы доказано.

Как было показано в начале доказательства, $A_j - \lambda_j I_j = Q_j$ является нильпотентным оператором. Найдём его индекс нильпотентности.

Рассмотрим минимальный многочлен p_0 оператора A .

$$\begin{aligned} p_0(A) &= p_0(A_1) \oplus \dots \oplus p_0(A_m) = O \\ p_0(\lambda) &= (\lambda - \lambda_1)^{k_1^0} \dots (\lambda - \lambda_m)^{k_m^0} \\ p_0(A_j) &= \prod_{i=1}^m (A_j - \lambda_i I_j)^{k_i^0} \end{aligned}$$

Каждый из операторов $A_j - \lambda_i I_j$, $i \neq j$ обратим⁵, а значит и не нильпотентен. Так как $p_0(A_j) = O$ и $(A_j - \lambda_i I_j)^{k_i^0} \neq O$ при $i \neq j$, получаем, что $(A_j - \lambda_j I_j)^{k_j^0} = Q_j^{k_j^0} = O$.

В силу минимальности многочлена p_0 получаем, что k_j^0 — индекс нильпотентности Q_j . Теорема полностью доказана. \square

Теорема 6.2. *Чтобы оператор $A \in L(X)$ был оператором простой структуры, необходимо и достаточно, чтобы все корни минимального многочлена оператора A имели кратность 1.*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Необходимость

Пусть A — оператор простой структуры со спектром $\sigma(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$. По теореме 3.2, оператор имеет вид

$$A = \lambda_1 I_1 \oplus \dots \oplus \lambda_m I_m$$

Тогда для любого многочлена $f \in \mathcal{P}(\mathbb{C})$ справедливо

$$f(A) = f(\lambda_1) I_1 \oplus \dots \oplus f(\lambda_m) I_m$$

Тогда для того чтобы многочлен f был аннулирующим, достаточно условия $\forall k \in \overline{1, n} \ f(\lambda_k) = 0$, значит, минимальный многочлен

⁵ $\sigma(A_j) = \{\lambda_j\}$

будет иметь вид

$$p_0(\lambda) = (\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_1)$$

Достаточность

Пусть $p_0(\lambda) = (\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_m)$ — минимальный. По теореме 6.1 получаем, что оператор A имеет вид

$$A = \bigoplus_{j=1}^m (\lambda_j I_j + Q_j),$$

где Q_j — нильпотентный, причем его индекс нильпотентности равен кратности корня λ_j в минимальном многочлене, то есть единице:

$$Q_j = O$$

Значит, оператор A имеет вид

$$A = \bigoplus_{j=1}^m \lambda_j I_j,$$

откуда и следует, что A — оператор простой структуры. \square

§7. TODO: Жорданов базис для нильпотентных операторов

§8. TODO: Жорданов базис и жорданова форма линейных операторов

§9. Сопряжённые операторы

Далее будет рассматриваться конечномерное пространство со скалярным произведением (евклидово пространство) H над полем действительных либо комплексных чисел.

Лемма 9.1. *Любой линейный функционал $\xi : H \rightarrow \mathbb{K}$ допускает единственное представление вида*

$$\xi(x) = \langle x, a \rangle, \quad a \in H$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Выберем некоторый ортонормированный базис e_1, \dots, e_n в H . Пусть $\xi : H \rightarrow \mathbb{K}$ — линейный функционал.

Определим a следующим образом:

$$a = \sum_{j=1}^n \overline{\xi(e_j)} e_j$$

Рассмотрим скалярное произведение $\langle e_k, a \rangle$, $k = \overline{1, n}$:

$$\langle e_k, a \rangle = \langle e_k, \sum_{j=1}^n \overline{\xi(e_j)} e_j \rangle = \langle e_k, \overline{\xi(e_k)} e_k \rangle = \xi(e_k)$$

Тогда

$$\xi(x) = \sum_{j=1}^n x_j \xi(e_j) = \sum_{j=1}^n x_j \langle e_j, a \rangle = \left\langle \sum_{j=1}^n x_j e_j, a \right\rangle = \langle x, a \rangle \quad \square$$

Определение 9.1. Оператор $B \in L(H)$ называется *сопряжённым* к $A \in L(H)$, если

$$\langle Ax, y \rangle = \langle x, By \rangle \quad \forall x, y \in H$$

Лемма 9.2. Для любого линейного оператора в евклидовом пространстве существует единственный сопряжённый оператор.
ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $y \in H$.

Рассмотрим функционал $\xi_y : H \rightarrow \mathbb{K}$ вида

$$\xi_y(x) = \langle Ax, y \rangle$$

По лемме 1 существует $a \in H$, что

$$\xi_y(x) = \langle x, a \rangle$$

Положим $By = a$. Докажем, что B — линейный оператор из $L(H)$.

Пусть $y = \alpha y_1 + \beta y_2$.

$$\begin{aligned} \xi_{y_1}(x) &= \langle Ax, y_1 \rangle &= \langle x, By_1 \rangle \\ \xi_{y_2}(x) &= \langle Ax, y_2 \rangle &= \langle x, By_2 \rangle \\ \xi_y(x) &= \langle Ax, \alpha y_1 + \beta y_2 \rangle = \langle x, B(\alpha y_1 + \beta y_2) \rangle \\ \xi_y(x) &= \langle Ax, \alpha y_1 \rangle + \langle Ax, \beta y_2 \rangle = \overline{\alpha} \xi_{y_1}(x) + \overline{\beta} \xi_{y_2}(x) = \\ &= \langle x, \alpha By_1 + \beta By_2 \rangle \\ \langle x, B(\alpha y_1 + \beta y_2) \rangle &= \langle x, \alpha By_1 + \beta By_2 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(\alpha y_1 + \beta y_2) &= \alpha B y_1 + \beta B y_2 \\ \langle Ax, y \rangle &= \langle x, By \rangle \end{aligned}$$

□

Сопряженный оператор обозначается звёздочкой:

$$A^* = B$$

Лемма 9.3 (свойства сопряженных операторов). Для любых операторов $A, B \in L(H)$ и любых чисел $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$ справедливы следующие утверждения:

1. $(\alpha I)^* = \bar{\alpha} I$
2. $(AB)^* = B^* A^*$
3. $(\alpha A + \beta B)^* = \bar{\alpha} A^* + \bar{\beta} B^*$
4. Если A обратим, то и A^* обратим, причём

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

5. $(A^*)^* = A$
6. Если M — инвариантное подпространство A и A^* , то

$$(A|M)^* = A^*|M$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

1. $\langle \alpha I x, y \rangle = \alpha \langle x, y \rangle = \langle x, \bar{\alpha} y \rangle = \langle x, \overline{\alpha I} y \rangle = \langle x, (\alpha I)^* y \rangle$
2. $\langle ABx, y \rangle = \langle A(Bx), y \rangle = \langle Bx, A^* y \rangle = \langle x, B^* A^* y \rangle$
3. Доказывается аналогично (используются свойства скалярного произведения)
4. $AA^{-1} = A^{-1}A = I$
 $(AA^{-1})^* = (A^{-1}A)^* = I^*$
 $(A^{-1})^* A^* = A^* (A^{-1})^* = I$
 $(A^{-1})^* = (A^*)^{-1}$
5. Доказывается при помощи свойства эрмитовой симметричности скалярного произведения.
6. Очевидно.

□

Лемма 9.4. Пусть $A \in L(H)$. Тогда H раскладывается в ортогональную прямую сумму подпространств $H = \text{Im } A \oplus \text{Ker } A^*$ и $H = \text{Ker } A \oplus \text{Im } A^*$.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Для доказательства леммы достаточно показать, что $(\text{Im } A)^\perp = \text{Ker } A^*$. Пусть $y \in (\text{Im } A)^\perp$. Тогда $\langle Ax, y \rangle = 0$, т. к. $\forall x \in H \ y \perp Ax \in \text{Im } A$. Значит $\langle x, A^*y \rangle = 0$. Тогда, в силу произвольности x , подставляя вместо него A^*y получаем

$$\langle A^*y, A^*y \rangle = 0 \Rightarrow A^*y = 0 \Rightarrow y \in \text{Ker } A^*$$

Теперь обратно: пусть $y \in \text{Ker } A^*$. Тогда $\langle x, A^*y \rangle = 0$, и $\langle Ax, y \rangle = 0$, значит $y \perp \text{Im } A$ и тогда $y \in (\text{Im } A)^\perp$. \square

Непосредственно из леммы 9.4 следует

Теорема 9.1 (Фредгольма). Уравнение вида

$$Ax = b, \quad b \in H$$

разрешимо тогда и только тогда, когда вектор b перпендикулярен всем решениям однородного уравнения

$$A^*y = 0$$

Лемма 9.5. Пусть e_1, \dots, e_n — ортонормированный базис, $A, B \in L(H)$, $\mathcal{A} = (a_{ij}) \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$, $\mathcal{B} = (b_{ij}) \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$ — матрицы этих операторов в том же базисе. Тогда для того чтобы $B = A^*$ необходимо и достаточно, чтобы $b_{ij} = \overline{a_{ji}}$.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

$$Ae_j = x = \sum_{i=1}^n a_{ij}e_i = \sum_{i=1}^n \langle x, e_i \rangle e_i = \sum_{i=1}^n \langle Ae_j, e_i \rangle$$

Таким образом

$$a_{ij} = \langle Ae_j, e_i \rangle$$

Доказательство в обе стороны проводится аналогично:

$$Ae_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}e_i$$

$$a_{ij} = \langle Ae_j, e_i \rangle = \langle e_j, A^*e_i \rangle = \overline{\langle A^*e_i, e_j \rangle} = \overline{b_{ji}} \quad \square$$

Определение 9.2. Оператор $A \in L(H)$ называется *самосопряжённым*, если $A^* = A$

$$\langle Ax, y \rangle = \langle x, Ay \rangle$$

Пример 9.1. Пусть $A \in L(H)$. Тогда операторы

$$\Re A = \frac{A + A^*}{2}$$

$$\Im A = \frac{A - A^*}{2i}$$

являются самосопряженными. При этом $A = \Re A + i \Im A$. \diamond

Пример 9.2. Самосопряженным является оператор AA^* :

$$(AA^*)^* = (A^*)^* A^* = AA^* \quad \diamond$$

Определение 9.3. Матрица $\mathcal{B} = (b_{ij}) \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$ называется сопряженной к $\mathcal{A} = (a_{ij}) \in \text{Matr}_n(\mathbb{K})$, если

$$b_{ij} = \overline{a_{ji}}$$

Непосредственно из леммы 9.5 следует, что оператор $A \in L(H)$ является самосопряженным тогда и только тогда, когда его матрица в некотором ортонормированном базисе является самосопряженной.

Определение 9.4. Проектор $P \in L(H)$ называется *ортгогональным* (*ортотпроектором*), если он осуществляет разложение H в ортогональную прямую сумму.

$$H = \text{Im } P \oplus \text{Im}(I - P)$$

$$\text{Im } P \perp \text{Im}(I - P) = \text{Ker } P$$

Лемма 9.6. Проектор $P \in L(H)$ является ортотпроектором тогда и только тогда, когда $P^* = P$.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Необходимость

Пусть P — ортотпроектор, то есть

$$\text{Im } P \perp \text{Im}(I - P)$$

Пусть $H \ni x = x_1 + x_2$, $H \ni y = y_1 + y_2$, где $x_1, y_1 \in \text{Im } P$, $x_2, y_2 \in \text{Im}(I - P)$.

$$\begin{aligned} \langle Px, y \rangle &= \langle x_1, y_1 + y_2 \rangle = \langle x_1, y_1 \rangle + \langle x_1, y_2 \rangle = \\ &= \langle x_1, Py \rangle = \langle x_1 + x_2, Py \rangle = \langle x, Py \rangle \end{aligned}$$

Достаточность

Пусть проектор P самосопряжен. Тогда по лемме 9.4 получаем,

что

$$H = \text{Im } P \oplus \text{Ker } P = \text{Im } P \oplus \text{Im}(I - P)$$

где предполагается разложение в ортогональную прямую сумму. \square

Следствие 1. *Дополнительный проектор к ортопроектору есть ортопроектор.*

$$(I - P)^* = I^* - P^* = I - P$$

Определение 9.5. $B \in L(H)$ называется *антисамосопряжённым* (кососамосопряжённым), если $B^* = -B$.

Лемма 9.7. *Если $B \in L(H)$ — антисамосопряжённый оператор, то существует самосопряжённый оператор A такой, что $B = iA$.*

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $B^* = -B$, $A = -iB$.

$$A^* = iB^* = -iB = A$$

то есть A — самосопряжённый оператор и $B = iA$. \square

Определение 9.6. Оператор $U \in L(H)$ называется *унитарным*, если имеют место равенства:

$$U^*U = UU^* = I,$$

т. е. U — обратим и $U^* = U^{-1}$.

Пусть U — унитарный оператор.

$$\|Ux\|^2 = \langle Ux, Ux \rangle = \langle x, U^*Ux \rangle = \langle x, x \rangle = \|x\|^2$$

То есть *всякий унитарный оператор сохраняет длины векторов (является изометрией)* (можно показать, что верно и обратное: всякий изометрический изоморфизм есть унитарный оператор).

Определение 9.7. Оператор $A \in L(H)$ называется *нормальным*, если

$$AA^* = A^*A$$

Непосредственно из определений следует, что самосопряжённые, кососамосопряжённые и унитарные операторы являются нормальными.

Лемма 9.8. *Пусть $A, B \in L(X)$ — операторы в произвольном линейном пространстве — перестановочны:*

$$AB = BA$$

Тогда $\text{Ker } B$ и $\text{Im } B$ являются инвариантными подпростран-

ствами для A

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $x \in \text{Ker } B$, тогда $Bx = 0$

$$B(Ax) = A(Bx) = A0 = 0 \Rightarrow Ax \in \text{Ker } B$$

Аналогично доказывается для образа. □

Лемма 9.9.

$$\sigma(A^*) = \overline{\sigma(A)}$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Пусть $\lambda \in \mathbb{K}$.

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

Оператор $A - \lambda I$ обратим тогда и только тогда, когда обратим $A^* - \bar{\lambda} I$, откуда и следует утверждение теоремы. □

Теорема 9.2. Пусть $A \in L(H)$ — нормальный оператор, его спектр $\sigma(A) = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$, $\mathbb{K} = \mathbb{C}$. Тогда

$$1. E(\bar{\lambda}_i, A^*) = E(\lambda_i, A), \quad i = \overline{1, m}$$

2. Пространство H раскладывается в ортогональную прямую сумму

$$H = E(\lambda_1, A) \oplus \dots \oplus E(\lambda_m, A)$$

3. A и A^* — операторы простой структуры

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Рассмотрим собственное подпространство $E(\lambda_k, A) = M$. Поскольку A и A^* перестановочны, то по лемме 9.8 для оператора A^* подпространство M также будет инвариантным.

Покажем, что $E(\lambda_k, A) \subset E(\bar{\lambda}_k, A^*)$. Пусть $x \in E(\lambda_k, A)$. Рассмотрим сужение $(A - \lambda_k I)_M = O_M$. M инвариантно для $A - \lambda_k I$ и для $A^* - \bar{\lambda}_k I$ и по пункту (6) леммы 9.3 получаем, что

$$O_M = (A - \lambda_k I)_M = ((A - \lambda_k I)^*)_M = (A^* - \bar{\lambda}_k I)_M$$

Таким образом

$$(A^* - \bar{\lambda}_k I)_M = O_M$$

Значит $A^* x = \bar{\lambda}_k x$, а следовательно $x \in E(\bar{\lambda}_k, A^*)$.

Обратное включение доказывается аналогично.

Итак, $E(\lambda_1, A) = E(\lambda_1, A^*)$.

$$H = E(\lambda_1, A) \oplus H_1, \quad H_1 = (E(\lambda_1, A))^\perp$$

Докажем, что H_1 инвариантно для A (аналогично показывается для A^*).

Пусть $x \in H_1$, $e \in E(\lambda_1, A)$.

$$\begin{aligned} \langle Ax, e \rangle &= \langle x, A^*e \rangle = \langle x, \overline{\lambda_1}e \rangle = \lambda_1 \langle x, e \rangle = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow Ax \perp E(\lambda_1, A) \Rightarrow Ax \in H_1 \end{aligned}$$

Таким образом операторы A и A^* раскладываются в прямую сумму операторов:

$$\begin{aligned} A &= \lambda_1 I_1 \oplus A_2 \\ A^* &= \overline{\lambda_1} I_1 \oplus A_2^* \end{aligned}$$

Из пункта (4) теоремы 3.3 получаем, что

$$\sigma(A) = \{\lambda_2, \dots, \lambda_m\}$$

Продолжая аналогичный процесс для операторов A_2 и A_2^* до тех пор, пока не останется одна точка спектра, получаем разложение:

$$\begin{aligned} A &= \lambda_1 I_1 \oplus \dots \oplus \lambda_{m-1} I_{m-1} \oplus A_m \\ A^* &= \overline{\lambda_1} I_1 \oplus \dots \oplus \overline{\lambda_{m-1}} I_{m-1} \oplus A_m^* \end{aligned}$$

относительно подпространств

$$\begin{aligned} H &= E(\lambda_1, A) \oplus \dots \oplus E(\lambda_{m-1}, A) \oplus H_m \\ H &= E(\overline{\lambda_1}, A) \oplus \dots \oplus E(\overline{\lambda_{m-1}}, A) \oplus H_m \end{aligned}$$

где A_m и A_m^* — сопряженные операторы с одной точкой спектра. A_m можно представить в виде

$$A_m = \lambda_m I_m + Q,$$

где Q — нильпотентный либо нулевой.

Понятно, что если $x \in E(\lambda_m, A)$, то $Qx = 0$. Рассмотрим прямую сумму

$$H_m = E(\lambda_m, A) \oplus (E(\lambda_m, A))^\perp$$

Как уже было показано, $(E(\lambda_m, A))^\perp$ — инвариантное подпространство. Пусть $x \in (E(\lambda_m, A))^\perp$. Тогда и $Ax \in (E(\lambda_m, A))^\perp$.

$$\begin{aligned} (E(\lambda_m, A))^\perp \ni Ax &= \lambda_m x + Qx, \\ \lambda_m x &\in E(\lambda_m, A), \quad Qx \in (E(\lambda_m, A))^\perp \end{aligned}$$

По определению прямой суммы Ax единственным образом пред-

ставимо в виде суммы

$$Ax = 0 + Qx$$

Таким образом $\lambda_m x = 0$, откуда следует, что $x = 0$, то есть $H_m = E(\lambda_m, A)$, $A_m = \lambda_m I_m$, что и требовалось доказать. \square

Следствие 1. *Каждый нормальный оператор допускает разложение*

$$A = \sum_{k=1}^m \lambda_k P_k,$$

где $P_k^* = P_k$, $k = \overline{1, m}$. При этом

$$A^* = \sum_{k=1}^m \overline{\lambda_k} P_k$$

(следует из свойств сопряженных операторов)

Теорема 9.3. Пусть $A \in L(H)$ — самосопряженный оператор в комплексном евклидовом пространстве. Тогда его спектр состоит из вещественных собственных значений и существует ортонормированный базис, составленный из собственных векторов оператора A .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. По следствию из теоремы 9.2 оператор A имеет разложение

$$A = \sum_{k=1}^m \lambda_k P_k$$

При этом

$$A^* = \sum_{k=1}^m \overline{\lambda_k} P_k$$

Так как $A = A^*$ получаем

$$\sum_{k=1}^m (\lambda_k - \overline{\lambda_k}) P_k = O$$

Применим к обеим частям равенства оператор P_j , $j = \overline{1, m}$:

$$P_j \left(\sum_{k=1}^m (\lambda_k - \overline{\lambda_k}) P_k \right) = O$$

Отсюда получаем

$$(\lambda_j - \overline{\lambda_j})P_j = 0 \Rightarrow \lambda_j = \overline{\lambda_j}$$

То есть $\lambda_j \in \mathbb{R}$.

Теперь, чтобы получить ортонормированный базис, рассмотрим разложение H в ортогональную прямую сумму

$$H = E(\lambda_1, A) \oplus \cdots \oplus E(\lambda_m, A)$$

и выберем в каждом собственном подпространстве ортонормированный базис. Их объединение и будет ортонормированным базисом в H . \square

Теорема 9.4. Пусть $U \in L(H)$ — унитарный оператор. Тогда его спектр лежит на единичной окружности, т. е.

$$|\lambda_j| = 1, \forall \lambda_j \in \sigma(U),$$

и существует ортонормированный базис, состоящий из собственных векторов оператора U .

Доказательство. Пусть $U \in L(H)$ — унитарный, то есть $U^* = U^{-1}$. Тогда

$$U = \sum_{k=1}^m \lambda_k P_k$$

и

$$U^{-1} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{\lambda_k} P_k = U^*$$

Аналогично случаю самосопряженного оператора можно показать, что

$$\frac{1}{\lambda_k} = \overline{\lambda_k}$$

а это значит, что

$$\lambda_k \overline{\lambda_k} = 1 \Rightarrow |\lambda_k| = 1$$

Утверждение о базисе доказывается аналогично предыдущей теореме. \square

Определение 9.8. Матрица \mathcal{A} называется *нормальной*, если

$$\mathcal{A}\mathcal{A}^* = \mathcal{A}^*\mathcal{A}$$

Определение 9.9. Матрица \mathcal{A} называется *ортогональной*, если

$$\mathcal{A}\mathcal{A}^* = \mathcal{A}^*\mathcal{A} = E$$

§10. Самосопряженные операторы в вещественных пространствах

Пусть H — вещественное евклидово пространство. Расширение пространства H осуществим по схеме, близкой к расширению поля \mathbb{R} до поля \mathbb{C} . А именно, рассмотрим (вещественное) линейное пространство $\bar{H} = H^2$. Введём операцию умножения пары $(x, y) \in H^2$ на комплексное число $\alpha + \beta i$ следующим образом:

$$(\alpha + \beta i)(x, y) = (\alpha x - \beta y, \beta x + \alpha y)$$

Несложно проверить, что эта операция удовлетворяет требуемым аксиомам умножения на число в линейном пространстве, а значит пространство \bar{H} с таким внешним законом композиции является комплексным.

Каждую пару $(x, y) \in \bar{H}$, по аналогии с комплексными числами, будем обозначать $x + iy$.

Определим скалярное произведение в \bar{H} следующим образом:

$$\langle x_1 + iy_1, x_2 + iy_2 \rangle = \langle x_1, x_2 \rangle + \langle y_1, y_2 \rangle + i\langle x_2, y_1 \rangle - i\langle x_1, y_2 \rangle$$

Теперь \bar{H} имеет структуру комплексного евклидова пространства.

Определение 10.1. Построенное пространство \bar{H} называется *комплексификацией* вещественного евклидова пространства H .

Определение 10.2. Пусть $A \in L(H)$. Линейный оператор $\bar{A} \in L(\bar{H})$, определённый формулой

$$\bar{A}(x, y) = (Ax, Ay), \quad (x, y) \in \bar{H},$$

или иначе

$$\bar{A}(x + iy) = Ax + iAy, \quad x + iy \in \bar{H},$$

называется *расширением* оператора A на H .

Замечание 10.1. Пусть e_1, \dots, e_n образуют базис в H . Тогда векторы $(e_1, 0), \dots, (e_n, 0)$ образуют базис в \bar{H} (докажите!)

Замечание 10.2. Из предыдущего замечания следует, что матрицы операторов A и \bar{A} в одном и том же базисе совпадают.

Замечание 10.3. Пусть $A \in L(H)$.

$$\begin{aligned} \langle \bar{A}(x_1 + iy_1), x_2 + iy_2 \rangle &= \langle Ax_1 + iAy_1, x_2 + iy_2 \rangle = \\ &= \langle Ax_1, x_2 \rangle + \langle Ay_1, y_2 \rangle + i\langle Ay_1, x_2 \rangle - i\langle Ax_1, y_2 \rangle = \\ &= \langle x_1, A^*x_2 \rangle + \langle y_1, A^*y_2 \rangle + i\langle y_1, A^*x_2 \rangle - i\langle x_1, A^*y_2 \rangle = \end{aligned}$$

$$= \langle x_1 + iy_1, A^*x_2 + iA^*y_2 \rangle = \langle x_1 + iy_1, \overline{A^*}(x_2 + iy_2) \rangle$$

Это означает, что оператор, сопряженный к расширению оператора A есть расширение A^* . Отсюда следует, что если $A = A^*$, то $\bar{A} = \bar{A}^*$.

Пусть $A \in L(H)$ — самосопряженный оператор, \bar{A} — его расширение на \bar{H} (также самосопряженный). Их матрицы совпадают, поэтому совпадают характеристические многочлены, а следовательно и спектры. По теореме 9.3 спектр оператора \bar{A} состоит только из вещественных собственных значений. Таким образом спектр самосопряженного оператора в вещественном евклидовом пространстве непуст.

Теорема 10.1. Пусть $A \in L(H)$ — самосопряженный оператор. Тогда $\sigma(A) \neq \emptyset$ и существует ортонормированный базис, составленный из собственных векторов этого оператора.