

Th. $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ - различные собственные значения $\mathcal{A} : V \rightarrow V$, им соответствуют U_{λ_i} - собственные подпространства V для λ_i

□ $e^{(1)} = \{e_1^{(1)}, \dots, e_{k_1}^{(1)}\}, e^{(2)} = \{e_1^{(2)}, \dots, e_{k_2}^{(2)}\}, \dots$ - базисы $U_{\lambda_1}, U_{\lambda_2}, \dots$

Составим систему $e = \{e_1^{(1)}, \dots, e_{k_1}^{(1)}, \dots, e_1^{(p)}, \dots, e_{k_p}^{(p)}\}$ (*)

Тогда система e - линейно независима

□ Составим линейную комбинацию:

$$1) \quad \overbrace{\alpha_1 e_1^{(1)} + \dots + \alpha_{k_1} e_{k_1}^{(1)}}^{x_1 \in U_{\lambda_1}} + \dots + \overbrace{\gamma_1 e_1^{(p)} + \dots + \gamma_{k_p} e_{k_p}^{(p)}}^{x_p \in U_{\lambda_p}} = 0$$

Тогда $\sum_{i=1}^p x_i = 0$ (x_i - линейно независимы, так как λ_i - различны) - этого не может быть, так как $\forall i \ x_i \neq 0$ (как собственный вектор)

2) В $\forall U_{\lambda_i}$ содержится 0-вектор. Тогда $\sum_{i=1}^n x_i = 0 \iff \forall x_i = 0$

Но $x_j = \sum_{i=1}^{k_j} c_i e_i^{(j)} = 0$ ($e_i^{(j)}$ - базисные, т. е. л/нез) $\implies \forall c_j = 0$ (комбинация должна быть тривиальна)

□

Nota. Таким образом, объединение базисов собственных подпространств U_{λ_i} образует линейно независимую систему в V^n

Что можно сказать о размерности системы e (*) ?

Обозначим $S = \sum_{i=1}^p \dim U_{\lambda_i} = \sum_{i=1}^p \beta_i$, β_i - геометрическая кратность λ_i

Очевидно, $S \leq n$

Th. $S = n \iff \exists$ базис V^n , составленный из собственных векторов

□ Система $e = \{e_1^{(1)}, \dots, e_{k_1}^{(1)}, \dots, e_1^{(p)}, \dots, e_{k_p}^{(p)}\}$ состоит из собственных векторов

Если $S = n$, получаем n собственных векторов, линейно независимых - базис V^n

Если \exists базис из n лин. незав. собственных векторов, тогда $\dim e = S = n$

□

Nota. Условие Th равносильно: $V^n = \sum_{i=1}^p \oplus U_{\lambda_i} (\lambda_i \neq \lambda_j)$

Действительно: $\dim V^n = \sum_{i=1}^p \dim U_{\lambda_i}$ и $\forall i, j \ U_{\lambda_i} U_{\lambda_j} = 0$

Ex. Если $\exists n$ различных собственных чисел $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, то $\dim U_{\lambda_i} = 1 \forall i$

Def. Оператор \mathcal{A} диагонализируемый, если существует базис $e \mid A_e$ - диагональна

Th. \mathcal{A} - диаг.-ем $\iff \exists$ базис из собственных векторов

$\square \iff e = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис собственных векторов

Собственный вектор (def): $\exists \lambda_i \mid \mathcal{A}e_i = \lambda_i e_i = 0 \cdot e_1 + \dots + \lambda_i e_i + \dots + 0 \cdot e_n$

$$\begin{cases} \mathcal{A}e_1 = \lambda_1 e_1 + \sum_{k \neq 1} 0 \cdot e_k \\ \mathcal{A}e_2 = \lambda_2 e_2 + \sum_{k \neq 2} 0 \cdot e_k \\ \vdots \end{cases} \iff \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix} \cdots e_i = \mathcal{A}e_i$$

$\implies \exists f$ - базис, в котором A_f - диагональная (по $-äëää. - \hat{a}i$)

$$A_f = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix} \quad \text{Применим } \mathcal{A} \text{ к } f_i \in f$$

$$\mathcal{A}f_i = A_f f_i = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha_n \end{pmatrix} f_i = \alpha_i f_i \implies \alpha_i - \text{собственное число (по def), а } f_i - \text{собственный вектор}$$

\square

Nota. О связи алгебраической и геометрической кратностей (α - алг., β - геом.)

1) α, β не зависят от выбора базиса

$\square \beta_i$ по определению $\dim U_{\lambda_i}$ и не связана с базисом

Для α : строим вековое уравнение $|A_f - \lambda I| = 0 \implies \lambda_i$ с кратностью α_i , $\alpha = \sum \alpha_i$

$\square A_g$ - матрица \mathcal{A} в базисе g

Но $A_g = T_{f \rightarrow g} A_f T_{g \rightarrow f}$ или для оператора

$$A_g - \lambda I = T_{f \rightarrow g} (A_f - \lambda I) T_{g \rightarrow f} = \overbrace{T_{f \rightarrow g} A_f T_{g \rightarrow f}}{=A_g} - \overbrace{\lambda T_{f \rightarrow g} I T_{g \rightarrow f}}{=\lambda I} = A_g - \lambda I$$

Таким образом, матрицы $A_g - \lambda I$, $A_f - \lambda I$ - подобные

Def. Подобные матрицы - матрицы, получаемые при помощи преобразования координат

Тогда $\det(A_f - \lambda I) = \det(A_g - \lambda I)$ (инвариант) \implies одинаковая кратность

\square

2) Геометрическая кратность не превышает алгебраической. У диагоналируемого оператора $\alpha = \beta$

2.8. Самосопряженные операторы

1* Сопряженные операторы

!!! Далее будем рассматривать операторы только в евклидовом пространстве над вещественном полем

Пространство со скалярным произведением над комплексным полем называется унитарным

Мет. Скалярное произведение

$$(x, y) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$$

$$1) (x + y, z) = (x, z) + (y, z)$$

$$2) (\lambda x, y) = \lambda(x, y)$$

$$3) (x, x) \geq 0, \quad (x, x) = 0 \implies x = 0$$

$$4) (x, y) = (y, x) \text{ в } \mathbb{R}. \text{ Но в комплексном множестве: } (x, y) = \overline{(y, x)}. \text{ Тогда } (x, \lambda y) = \overline{(\lambda y, x)}$$