Содержание

Nota. Изоморфизм $E^n \to E'^n$ позволяет переносить свойства скалярного произведения из одного в другое пространство

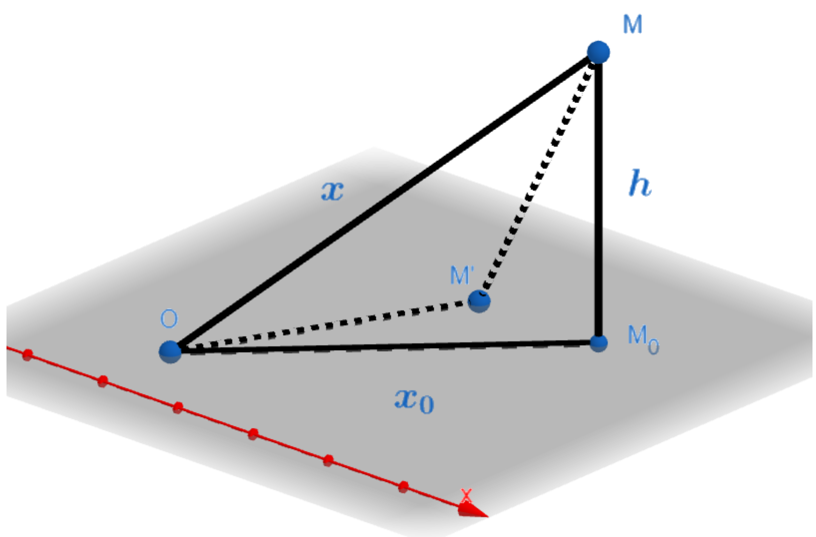
Ex: $\|x+y\| \le \|x\| + \|y\|$ - арифметические векторы со скалярным произведением $(x, y) = \Sigma_{i=1}^n x_i y_i$

$E'^n \in C_{[a;b]}$ со скалярным произведением $(f, g) = \int_a^b f * g dx$

$\sqrt{\int_a^b (f*g)^2 dx} \le \sqrt{\int_a^b f^2 dx} + \sqrt{\int_a^b g^2 dx}$

Задача о перпендикуляре

Постановка: Нужно опустить перпендикуляр из точки пространства E^n на подпространство G



Точка M - конец вектора x в пространстве E^n. Нужно найти M_0 (конец вектора x_0, проекции x на G)

$$x_0 + h = x$$

где $h \perp G$. Правда ли что, длина перпендикулярного вектора h - минимальная длина от точки M до G?

Th. $h \perp G, x_0 \in G, x = x_0 + h$. Тогда $\forall x' \in G (x' \neq x_0) \quad \|x - x'\| > \|x - x_0\|$

$\square \|x - x'\| = \|x - x_0 + x_0 - x'\| \overset{\text{по теореме Пифагора}}{====} \|x - x_0\| + \|x_0 - x'\| = \|h\| + \|x_0 - x'\| > \|x - x_0\|$

Nota. x_0 называется ортогональной проекцией, возникает вопрос о ее вычислении (так находятся основания перпендикуляров)

Алгоритм: $x_0 = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e2 + \cdots + \lambda_k + e_k$, $\{e_i\}_{i=1}^k$ - базис G (необязательно ортонормированный)

Дан вектор x, пространство G, нужно найти λ_i

$h = x - x_0$, $h \perp G \quad (h, e_i) \overset{h \perp e_i\ \forall i}{=} 0$

$(x - x_0, e_i) = (x, e_i) - (x_0, e_i) = 0$

$(x, e_i) = (x_0, e_i)$

Тогда $\forall i \quad (x_0, e_i) = (\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_k e_k, e_i) = \lambda_1(e_1, e_i) + \dots + \lambda_k(e_k, e_i)$ - (e_k, e_i) - числа, а λ_i - неизвестные

Получили СЛАУ:

$$\begin{vmatrix} (e_1,e_1) & (e_1,e_2) & \dots & (e_1,e_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (e_k,e_1) & (e_k,e_2) & \dots & (e_k,e_k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_k \end{vmatrix} = \Gamma \times \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (x,e_1) \\ \dots \\ (x,e_k) \end{vmatrix}$$

Nota. В матрице Γ нет нулевых строк, так как e_i - бизисная и по крайней мере $e_i^2 \neq 0$

Таким образом по теореме Крамера $\exists!(\lambda_1, \dots, \lambda_k)$

Def. Матрица $\Gamma = (e_i, e_j)_{i,j=1\dots k}$ называют матрицей Грама

$\Gamma = I = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & 1 \end{vmatrix}$, если базис ортонормированный

Далее, I - единичная матрица Грама

Nota. Тогда $I \times \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_k \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (x,e_1) \\ \dots \\ (x,e_k) \end{vmatrix}$

Приложения задачи о перпендикуляре

1) Метод наименьших квадратов

В качестве простейшей модели зависимости $y = y(x)$ берем линейную функцию $y = \lambda x$

Ищем минимально отстоящую прямую от данных (x_i, y_i), то есть ищем λ

Определим расстояние (в этом методе) как $\sigma^2 = \Sigma_{i=1}^n (y_i - y_{0i})^2 = \Sigma_{i=1}^n (y_i - \lambda x_i)^2$ - минимизируем

Таким образом, ищем y_0 (ортог. проекция) такое, что $(y - y_0)^2 = \sigma^2$ - минимальное

Если $y_0 = \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_k x_k$, где x_i - набор измерений для i-ой точки

Рассмотрим y_0 как разложение по базису $\{x_i\}$

2) Многочлен Фурье

$P(t) = \dfrac{a_0}{2} + a_1 cost + b_1 sint + \dots a_n cosnt + b_n sinnt$ - линейная комбинация

Функции $1, cost, sint, \dots, cosnt, sinnt$ - ортогональны

Задача в том, чтобы для функции $f(t)$, определенной на отрезке $[0; 2\pi]$ найти минимально отстоящий многочлен $P(t)$ при том, что расстояние определяется как $\sigma^2 = \int_0^{2\pi} (f(t) - P(t))^2 dt$

Нужно найти a_i и b_i - обычные скалярные произведения $a_i = k \int_0^{2\pi} f(t) cos(it) dt$, $b_i = m \int_0^{2\pi} f(t) sin(it) dt$ (k, m - нормирующие множители)

2. Линейный оператор (линейное отображение, линейный функционал, линейное преображение)

2.1. Определение

Линейный оператор - это отображение $V^n \overset{\mathcal{A}}{\Longrightarrow} W^m$
(V^n, W^m - линейные пространства размерности $n \neq m$ в общем случае),
которое $\forall x \in V^n$ сопоставляет один какой-либо $y \in W^m$ и
$\mathcal{A}(\lambda x_1 + \mu x_2) = \lambda \mathcal{A} x_1 + \mu \mathcal{A} x_2 = \lambda y_1 + \mu y_2$

Nota. Заметим, что если 0 представим как $0 * x$, где $x \neq 0$, то
$\mathcal{A}(0) = \mathcal{A}(0 * x) = 0 * \mathcal{A}x \overset{0*y}{=} 0$

Nota. Если $V = W$, то $\mathcal{A}$ называют линейным преобразованием, но далее будем рассматривать в основном операторы $\mathcal{A}: \quad V \to V$, $\mathcal{A}: \quad V^n \to W^n$

Ex. 1. $V = \mathbb{R}^2$ - пространство направленных отрезков
$\mathcal{A} : V \leftarrow V$
$\mathcal{A}x = y = \lambda y_1 + \mu y_2$ для таких $\mathcal{A}$ как сдвиг, поворот, гомотетия, симметрия

Ex. 2. $V^n = W^m$, где $m < n$
$\mathcal{A}$ - оператор проектирования (убедиться, что он линейный)

Ex. 3. V^n - пространство числовых строк длины n
$\mathcal{A} : V^n \leftarrow V^n$
$x = (x_1, \ldots, x_n), y = (y_1, \ldots, y_n)$

$$\mathcal{A}x = y : \begin{vmatrix} a_{11} & \ldots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \ldots & a_{nn} \end{vmatrix} x = y$$

2.2. Действия с операторами

Def. $\mathcal{A}\mathcal{B} : V \to W$

1. $(\mathcal{A} + \mathcal{B})x \overset{def}{=} \mathcal{A}x + \mathcal{B}x$ - определение суммы $\mathcal{A} + \mathcal{B} = \mathcal{C}$
2. $(\lambda \mathcal{A})x \overset{def}{=} \lambda(\mathcal{A}x)$ - $\lambda \mathcal{A} = \mathcal{D}$

Nota. Сформируем линейное пространство из операторов $\mathcal{A} : V \to W$

1. Ассоциативность сложения (очевидно)
2. Коммутативность (очевидно)
3. Нейтральный элемент $\mathcal{O}x = 0$
4. Противоположный: $-\mathcal{A} = (-1) * A$
5. $\ldots LAB$

Def: $\mathcal{I}$ - тождественный - $\forall x \in V \quad \mathcal{I}x = x$

Def. Произведение операторов (композиция)
$\mathcal{AB}$ - произведение, $\mathcal{A}: V \to W$; $\mathcal{B}: U \to V$
$(\mathcal{AB})x = \mathcal{A}(\mathcal{B}x); \quad x \in U$
Свойства: Lab доказать
1* $\lambda(\mathcal{AB}) = (\lambda\mathcal{A})\mathcal{B}$
2* $(\mathcal{A}+\mathcal{B})\mathcal{C} = \mathcal{AC}+\mathcal{BC}$
3* $\mathcal{A}(\mathcal{B}+\mathcal{C}) = \mathcal{AB}+\mathcal{AC}$
4* $\mathcal{A}(\mathcal{BC}) = (\mathcal{AB})\mathcal{C}$

Nota. Можно обобщить 4* на n равных $\mathcal{A}$

Def. $\mathcal{A}^n = \mathcal{A}\cdot\mathcal{A}\dots\mathcal{A}$ - n раз, степень оператора
Свойства: $\mathcal{A}^{m+n} = \mathcal{A}^n \cdot \mathcal{A}^m$

2.3. Обратимость оператора

Def: $\mathcal{A}: V \to W$ так, что $\mathcal{A}V = W$ и $\forall x_1 \neq x_2 (x_1, x_2 \in V)$ $\begin{cases} y_1 = \mathcal{A}x_1 \\ y_2 = \mathcal{A}x_2 \end{cases} \Longrightarrow y_1 \neq y_2$
Тогда $\mathcal{A}$ называется взаимно-однозначно действующим
Nota: Проще сказать «линейный изоморфизм»

Th. $\{x_i\}$ - линейно независима $\xrightarrow{\mathcal{A}x=y}$ $\{y_i\}$ - линейно независима
В обратную сторону, если $\mathcal{A}$ - взаимно-однозначен
$\square$ $\sqsupset$ $\mathcal{A}: V \to W$ и $0_V, 0_W$ - нули V и W соответственно

1. $\mathcal{A}(0_V) = \mathcal{A}(\Sigma_{i=1}^{k} 0\cdot e_i) = \Sigma_{i=1}^{k} 0\cdot\mathcal{A}e_i = 0_W$
2. Докажем, что если $x_i \subset V$ - лин. нез., то $y_i \subset W$ - лин. нез.
   Составим $\Sigma_{j=1}^{m}\lambda_j y_j = 0_W$ (От противного) $\sqsupset$ $\{y_i\}$ - лин. зав., тогда $\exists\lambda_k \neq 0$
   При этом $\forall j \quad y_j = \mathcal{A}x_j$ (т. к. $\mathcal{A}$ - вз.-однозн., то $n' = m'$: кол-во x_i и y_i равно)
   $\Sigma^{m'}{}_{j=1}\lambda_j\mathcal{A}x_j \overset{\text{линейность}}{=} \mathcal{A}(\Sigma^{m'}{}_{j=1}\lambda_j x_j) = 0_W$
   Так как $\mathcal{A}0_V = 0_W$, то 0_W - образ $x = 0_V$, но так как $\mathcal{A}$ - вз.-однозн., то $\nexists x' \neq x \mid \mathcal{A}(x') = 0_W$
   Значит $\Sigma^{m'}{}_{j=1}\lambda_j x_j = 0_V$, но $\exists\lambda_k \neq 0 \Longrightarrow \{x_j\}$ - лин. зав. - противоречие
3. $\sqsupset$ теперь $\{y_i\}$ - л. нез., а $\{x_i\}$ (по предположению от противного) - лин. зав.
   $\Sigma_{i=1}^{n'}\lambda_i x_i \overset{\exists\lambda_k\neq 0}{=} 0_V \quad \Big|\mathcal{A}$
   $\Sigma_{i=1}^{n'}\lambda_i\mathcal{A}x_i = 0_W$
   При этом $\exists\lambda_k \neq 0 \Longrightarrow \{y_i\}$ - лин. зав. - противоречие

Следствие: $\dim V = \dim W \Longleftarrow \mathcal{A}$ - лин. изоморфизм
Def: $\mathcal{B}: W \to V$ называется обратным оператором для $\mathcal{A}: V \to W$
если $\mathcal{BA} = \mathcal{AB} = \mathcal{I}$ (обозначается $\mathcal{B} = \mathcal{A}^{-1}$)
Следствие: $\mathcal{AA}^{-1}x = x$

Th. $\mathcal{A}x = 0$ и $\exists\mathcal{A}^{-1}$, тогда $x = 0$
$\square\mathcal{A}^{-1}\mathcal{A}x = \mathcal{A}^{-1}(\mathcal{A}x) = \mathcal{A}^{-1}0_W = 0_V \Longrightarrow x = 0$

Th. Н. и Д. условия существования $\mathcal{A}^{-1}$

$\exists \mathcal{A}^{-1} \Longleftrightarrow \mathcal{A}$ - вз.-однозн.

$\square \Longrightarrow \exists \mathcal{A}^{-1}$, но $\sqsupset$ $\mathcal{A}$ - не вз.-однозн., то есть $\exists x_1, x_2 \in V(x_1 \neq x_2) \mid \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}x_2 \Longleftrightarrow \mathcal{A}x_1 - \mathcal{A}x_2 = 0 \Longleftrightarrow \mathcal{A}(x_1 - x_2) = 0_W \overset{\exists \mathcal{A}^{-1}}{\Longrightarrow} x = 0_V \Longleftrightarrow x_1 = x_2$ - противоречие

$\Longleftarrow$ Так как $\mathcal{A}$ - изоморфизм (не учитывая линейность), то $\exists \mathcal{A}'$ - обратное отображение (не обязат. линейное)

Докажем, что $\mathcal{A}' : W \to V$ - линейный оператор

? $\mathcal{A}'(\Sigma\lambda_i y_i) = \Sigma\lambda_i \mathcal{A}' y_i = \Sigma\lambda_i x_i$

$\mathcal{A}$ - вз.-однозн. $\Longleftrightarrow \forall x_i \longleftrightarrow y_i \quad \Big| \cdot \lambda_i, \Sigma$

$\mathcal{A}(\Sigma\lambda_i x_i) = \mathcal{A}x = y = \Sigma\lambda_i y_i$ и y имеет только один прообраз x

Применим $\mathcal{A}'$ к $y = \Sigma\lambda_i y_i$ $\mathcal{A}'y = x = \Sigma\lambda_i x_i$ - единственный прообраз y

Таким образом, $\mathcal{A}'$ переводит лин. комбинацию в такую же лин. комбинацию прообразов, то есть $\mathcal{A}'$ - линейный: $\mathcal{A}' = \mathcal{A}^{-1}$

2.4. Матрица ЛО

$\mathcal{A} : V^n \to W^m$

Возьмем вектор $x \in V^n$ и разложим по какому-либо базису $\{e_j\}_{j=1}^n$

$\mathcal{A}x = \mathcal{A}(\Sigma_{j=1}^n c_j e_j) = \Sigma_{j=1}^n c_j \mathcal{A} e_j$

$\mathcal{A}e_j \overset{\text{образ базисного вектора}}{=} y_j \overset{\{f_i\}- \text{ базис } W^m}{=} \Sigma_{i=1}^m a_{ij} f_i$

$\mathcal{A}x = \Sigma_{j=1}^n c_j \mathcal{A}e_j = \Sigma_{j=1}^n c_j \Sigma_{i=1}^m a_{ij} f_i = \Sigma_{j=1}^n \Sigma_{i=1}^m c_j a_{ij} f_i = \Sigma_{i=1}^m \Sigma_{j=1}^n c_j a_{ij} f_i$

Иллюстрация:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Def: Матрица $A = a_{ij_{i=1..m, j=1..n}}$ называется матрицей оператора $\mathcal{A} : V^n \to W^m$ в базисе $\{e_j\}_{j=1}^n$ пространства V^n

Вопросы:

1) $\forall ? \mathcal{A}\ \exists A$
2) $\forall ? A\ \exists \mathcal{A}$
3) если $\exists A$ для $\mathcal{A}$, то единственная?
4) если $\exists \mathcal{A}$ для A, то единственная?

Ответы:

1) При выбранном базисе $\{e_j\}$ $\forall \mathcal{A}\ \exists A$ (алгоритм выше)
3) такая A единственная $\Longrightarrow$ в разных базисах матрицы ЛО $\mathcal{A}$ $\quad A_e \neq A_{e'}$
2) $\forall A_{m \times n}$ можно взять пару ЛП V^n, W^m и определить $\mathcal{A} : V^n \to W_n$ по правилу $\mathcal{A}e_V = e'_W$
4) Lab.

Nota: Далее будем решать две задачи

1) преобразование координат как действие оператора
2) поиск наиболее простой матрицы в некотором базисе

2.5. Ядро и образ оператора

Def. Ядро оператора - $Ker\mathcal{A} \overset{def}{=} \{x \in V \mid \mathcal{A}x = 0_W\}$

Def. Образ оператора - $Im\mathcal{A} \overset{def}{=} \{y \in W \mid \mathcal{A}x = y\}$

Nota. $Ker\mathcal{A}$ и $Im\mathcal{A}$ - подпространства

Nota. $Ker\ \mathcal{A}$ и $Im\ \mathcal{A}$ - подпространства V $(\mathcal{A} : V \to V)$
Вообще-то $Ker\ \mathcal{A} \subset V, Im\ \mathcal{A} \subset W$ $(\mathcal{A} : V \to W)$
$\dim W \leq \dim V$, тогда можно считать, что $W \subset V'$ и рассмотрим $\mathcal{A} : V \to V'$ (где V' изоморфен V)
$Ker\mathcal{A}$ - подпространство, то есть $Ker\mathcal{A} \subset V$ и $\Sigma c_i x_i \subset \mathcal{A}$, если $\forall x_i \in Ker\mathcal{A}$
$\mathcal{A}(\Sigma c_i x_i) = \Sigma c_i \mathcal{A} x_i \overset{x_i \in \mathcal{A}}{=} \Sigma c_i 0 = 0$
Следствие: $Ker\mathcal{A} = 0 \Longrightarrow \mathcal{A}$ - вз.-однозн.
□ От противного:
$\sqsupset$ $\mathcal{A}$ - не вз.-однозн., то есть $\exists x_1, x_2 \in V(x_1 \neq x_2) | \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}x_2 \Longleftrightarrow \mathcal{A}(x_1 - x_2) = 0 \Longrightarrow x_1 - x_2 \in Ker\mathcal{A}$ - противоречие

Nota. Обратное также верно:
$\mathcal{A}$ - вз.-однозн. $\Longleftrightarrow y_1 = y_2 \Longrightarrow x_1 = x_2$, так как $\mathcal{A}(x_1 - x_2) = 0 \Longrightarrow x_1 - x_2 = 0$
Тогда 0 является образом только 0-вектора $\Longrightarrow Ker\mathcal{A} = 0$

Nota. Также очевидно, что
$Ker\mathcal{A} = 0 \Longleftrightarrow Im\mathcal{A} = V$
$Ker\mathcal{A} = V \Longrightarrow Im\mathcal{A} = 0$ и $\mathcal{A} = 0$

Th. $\mathcal{A} : V \to V$, тогда $\dim Ker\mathcal{A} + \dim Im\mathcal{A} = \dim V$
□ Так как $Ker\mathcal{A}$ - подпространство V, то можно построить дополнение до прямой суммы (взяв базисные векторы ядра, дополнить их набор до базиса V: $e_1^k, \dots e_m^k, e_{m+1}^k, \dots e_n^k$)
Обозначим дополнение W, тогда $Ker\mathcal{A} \oplus W = V \Longrightarrow \dim Ker\mathcal{A} + \dim W = \dim V$
Докажем, что W и $Im\mathcal{A}$ - изоморфны
$\mathcal{A} : W \to Im\mathcal{A}$
$\mathcal{A} : Ker\mathcal{A} \to 0$
Докажем, что $\mathcal{A}$ действует из W в $Im\mathcal{A}$ взаимно-однозначно
$\sqsupset$ $\mathcal{A}$ невз.-однозн., тогда $\exists x_1, x_2 \in W(x_1 \neq x_2) | \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}x_2 \in Im\mathcal{A}$
$\mathcal{A}(x_1 - x_2) = 0 \Longrightarrow x_1 - x_2 \overset{\text{обозн.}}{=} x \in Ker\mathcal{A}$, но $x \neq 0$, так как $x_1 \neq x_2$
Но для прямой суммы $W \cup Ker\mathcal{A} = 0, x \ni W \cup Ker\mathcal{A} \Longrightarrow$ предположение неверно
$\Longrightarrow \mathcal{A}$ - лин. вз.-однозн. $\Longrightarrow \dim W = \dim Im\mathcal{A}$
$V = W_1 \oplus W_2$ найдется ЛО $\mathcal{A} : V \to V$
$W_1 = Ker\mathcal{A}, W_2 = Im\mathcal{A}$

Def. Рангом оператора $\mathcal{A}$ называется $\dim Im\mathcal{A}$: $rang\mathcal{A} \overset{def}{=} \dim Im\mathcal{A} (= r(\mathcal{A}) = rank\mathcal{A})$

Nota. Сравним ранг оператора с рангом его матрицы

$\mathcal{A}x = y \quad \mathcal{A}: V^n \to W^m$

A - матрица $\mathcal{A}, x = x_1e_1 + x_2e_2 + \dots + x_ne_n, y = y_1f_1 + \dots + y_mf_m$

$$\mathcal{A}x = y \Longleftrightarrow \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}$$

Или при преобразовании базиса $Ae_i = e_i'$:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} e_1' \\ \vdots \\ e_m' \end{pmatrix}$$

Здесь $\begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}^T$ - это матрица $\begin{pmatrix} e_1 & \dots & e_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \dots \end{pmatrix}$

Nota. Поиск матрицы $\mathcal{A}$ можно осуществить, найдя ее в «домашнем» базисе $\{e_i\}$, то есть $A(e_1, \dots e_n) = (e_1', \dots, e_m')$

Затем, можно найти матрицу в другом (нужном) базисе, используя формулы преобразований (см. позже)

Тогда $Ker\mathcal{A} = K$ - множество векторов, которые решают систему

$AX = 0 \quad (\dim K = m = \dim \text{ФСР} = n - rangA)$ и при этом $\dim K = n - \dim Im\mathcal{A}$

$rang\mathcal{A} = rangA = \dim Im\mathcal{A}$

Следствия (без док-в)

1) $rang(\mathcal{A}\mathcal{B}) \le rang(\mathcal{A})$ (или $rang\mathcal{B}$)

2) $rang(\mathcal{A}\mathcal{B}) \ge rang(\mathcal{A}) + rang(\mathcal{B}) - \dim V$

Nota. Рассмотрим преобразование координат, как линейный оператор $T: V^n \to V^n$ (переход из системы $Ox_i \to Ox_i'$, $i = 1..n$)

$\dim ImT = n, \dim KerT = 0 \Longrightarrow T$ - вз.-однозн.

Поставим задачу отыскания матрицы в другом базисе, используя $T_{e\to e'}$

2.6. Преобразование матрицы оператора при переходе к другому базису

Th. $\mathcal{A}: V^n \to V^n$

$\{e_i\} \overset{\text{об}}{=} e$ и $\{e_i'\} \overset{\text{об}}{=} e'$ - базисы пространства V

$\mathcal{T}: V^n \to V^n$ - преобразование координат, то есть $Te_i = e_i'$

$\sqsupset A, A'$ - матрицы $\mathcal{A}$ в базисах e и e'

Тогда $A' = TAT^{-1}$ $(A'_{e'} = T_{e\to e'}AT^{-1}_{e\to e'})$

$\square \sqsupset y = \mathcal{A}x$, где x, y - векторы в базисе e $(x_e = x'_{e'}$ - один вектор)

$y' = \mathcal{A}x'$, где x', y' - векторы в базисе e'

$\mathcal{T}x = x', \mathcal{T}y = y'$

$y = Ax$, $y' = A'x'$, тогда $Ty = A'(Tx) \quad \Big| \cdot T^{-1}$

$T^{-1}Ty = (T^{-1}A'T)x$
$Ax = y = (T^{-1}A'T)x$
$A = T^{-1}A'T \Longrightarrow A' = TAT^{-1}$

Th. $A' = T_{e\to e'}AT^{-1}_{e\to e'}$

Nota. $C = A + \lambda B$
Следствия:
1) $TCT^{-1} = T(A+\lambda B)T^{-1} = TAT^{-1} + \lambda TBT^{-1}$
2) $B = I \quad TBT^{-1} = TIT^{-1} = I$, т. к. $TI = T, TT^{-1} = I$
3) $\det A^{-1} = \det(TAT^{-1}) = \det T \det A \det T^{-1} = \det A \cdot 1$

Nota. То есть характеристика нашего объекта - инвариант при преобразовании T

Def. Матрица A называется ортогональной если $A^{-1} = A^T$
Следствие: $AA^{-1} = AA^T = I$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

$\forall i \Sigma_{j=1}^n a_{ij}a_{ij} = (A_i, A_i) = 1 \ \forall i, j (i \neq j) \Sigma_{kk=1}^n a_{ik}a_{jk} = (A_i, A_j) = 0$

В общем $(A_i, A_j) = \left[\begin{array}{l} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{array}\right.$

Def. Оператор $\mathcal{A}$ называется ортогональным, если его матрица ортогональна
? A ортогональна в каком-либо базисе или во всех?

Свойство. $\mathcal{A}$ - ортогонален, то $\det A = \pm 1$ (следует из определения $\det(AA^T) = \det^2(A) = \det(I)$)

Th. $T_{e\to e'}$ - преобразование координат в V^n. Тогда T - ортогональный оператор
Базис e - ортонормированный базис

$\square \quad \sqsupset$ в базисе e матрица $T = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \dots & \tau_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{n1} & \dots & \tau_{nn} \end{pmatrix}$ - неортогональна

Тогда $e'_1 = \Sigma_{i=1}^n \tau_{1i}e_i \quad \Big| \cdot e'_1$

$1 = (e'_1, e'_1) = (\Sigma_{i=1}^n \tau_{1i}e_i)^2 = \tau_{11}^2 e_1^2 + \tau_{11}e_1\tau_{12}e_2 + \dots = \tau_{11}^2 + \dots + \tau_{1n}^2 = 1$ - то есть строка - единичный вектор

$0 = (e'_1, e'_2) = (\tau_{11}e_1 + \tau_{12}e_1 + \dots) \cdot (\tau_{21}e_1 + \tau_{22}e_2 + \dots) =$ произведение 1-ой строки на 2-ую, то есть строки ортогональны

Таким образом, матрица T - ортогональна

Nota. Тогда $A' = TAT^{-1} = TAT^T$

2.7. Собственные векторы и значения оператора

Def. Инвариантное подпространство оператора $\mathcal{A}: V \to V$ - это $U = \{x \in V_1 \in V | \mathcal{A}x \in V_1\}$

Ex. $V = \mathcal{P}_n(t)$ - пространство многочленов степени $\le n$ на $[a;b]$, $\mathcal{D} = \dfrac{d}{dt}$

Nota. $Ker\mathcal{A}, Im\mathcal{A}$ - инвариантные $(A : V \to V)$

Def. Характеристический многочлен оператора $\mathcal{A}: V \to V$ ($\mathcal{A}x = Ax, A$ - матрица в неком базисе)
$\xi(\lambda) = \det(A - \lambda I)$

Nota. Матрица $A - \lambda I$:
$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix}$$

Nota. Уравнение $\xi(\lambda) = 0$ называется вековым

Def. Собственным вектором оператора $\mathcal{A}$, отвечающим собственному значению λ, называется $x \ne 0 \mid \mathcal{A}x = \lambda x$

Def. Собственное подпространство оператора $\mathcal{A}$, отвечающее числу λ_i,
$U_{\lambda_i} = \{x \in V \mid \mathcal{A}x = \lambda_i x\} \cup \{0\}$

Def. $\dim U_{\lambda_i} = \beta$ - геометрическая кратность число λ_i

Th. $\mathcal{A}x = \lambda x \Longleftrightarrow \det(A - \lambda I) = 0, \quad A : V^n \to V^n$
$\square \Longleftrightarrow |A - \lambda I| = 0 \Longleftrightarrow rang(A - \lambda I) < n \Longleftrightarrow \dim Im(A - \lambda I) < n \Longleftrightarrow \dim Ker(A - \lambda I) \ge 1$
$\exists x \in Ker(A - \lambda I), x \ne 0 \mid (A - \lambda I)x = 0 \Longleftrightarrow Ax - \lambda Ix = 0 \Longleftrightarrow Ax = \lambda x$

Nota. По основной теореме алгебры вековое уравнение имеет n корней (не всех из них вещественные). В конкретном множестве $\mathcal{K} \ni \lambda$ их может не быть

Def. Кратность корня λ_i называется алгебраической кратностью

Th. $\lambda_1 \ne \lambda_2 (\mathcal{A}x_1 = \lambda_1 x_1, \mathcal{A}x_2 = \lambda_2 x_2) \Longrightarrow x_1, x_2$ - линейно независимы
$\square$ Составим комбинацию: $c_1x_1 + c_2x_2 = 0 \quad \Big| \cdot \mathcal{A}$
$\lambda_1 \ne \lambda_2 \Longrightarrow \lambda_1^2 + \lambda_2^2 \ne 0, \sqsupset \lambda_2 \ne 0$
$c_1\mathcal{A}x_1 + c_2\mathcal{A}x_2 = 0 \Longleftrightarrow c_1\lambda_1x_1 + c_2\lambda_2x_2 = 0$
Умножим $c_1x_1 + c_2x_2 = 0$ на λ_2: $c_1\lambda_2x_1 + c_2\lambda_2x_2 = 0$
$c_1\lambda_1x_1 + c_2\lambda_2x_2 - c_1\lambda_2x_1 - c_2\lambda_2x_2 = 0$
$c_1x_1(\lambda_1 - \lambda_2) = 0$

Так как $\lambda_1 \neq \lambda_2$ по условию, $x_1 \neq 0$ - собственный вектор, поэтому $c_1 = 0$, а комбинация линейно независима

Если $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \neq 0$: $c_2\lambda_2 x_2 = 0 \Longrightarrow c_2 = 0$

Nota. Приняв доказательство за базу индукции, можно доказать линейную независимость для k-ой системы собственных векторов для попарно различных k чисел λ

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

$\sqsupset e^{(1)} = \{e_1^{(1)}, \dots, e_{k_1}^{(1)}\}, e^{(2)} = \{e_1^{(2)}, \dots, e_{k_2}^{(2)}\}, \dots$ - 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) $\sqsupset \quad \overbrace{\alpha_1 e_1^{(1)} + \dots + \alpha_{k_1} e_{k_1}^{(1)}}^{x_1 \in U_{\lambda_1}} + \dots + \overbrace{\gamma_1 e_1^{(p)} + \dots + \gamma_{k_p} e_{k_p}^{(p)}}^{x_p \in U_{\lambda_p}} = 0$

Тогда $\Sigma_{i=1}^{p} x_i = 0$ (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 $\Sigma_{i=1}^{n} x_i = 0 \Longleftrightarrow \forall x_i = 0$

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

□

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

Что можно сказать о размерности системы e (*) ?

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

Очевидно, $S \leq n$

Th. $S = n \Longleftrightarrow \exists$ 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: $V^n = \Sigma_{i=1}^{p} \oplus U_{\lambda_i} (\lambda_i \neq \lambda_j)$

Действительно: $\dim V^n = \Sigma_{i=1}^{p} \dim U_{\lambda_i}$ 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 $\Longleftrightarrow \exists$ базис из собственных векторов

□ $\Longleftarrow e = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис собственных векторов

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

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

$\Longrightarrow \exists f$ - базис, в котором A_f - диагональная (по −äèàã. − åì)

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

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

□

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

1) α, β не зависят от выбора базиса

□β_i по определению $\dim U_{\lambda_i}$ и не связана с базисом

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

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

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

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

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) $\Longrightarrow$ одинаковая кратность

□

2) Геометрическая кратность не превышает алгебраической. У диагонализируемого 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

Mem. Скалярное произведение

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

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

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

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

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

Мет. (x, y) в $\mathbb{R}$
$(x, y) = (y, x)$
Но. (x, y) в комплексном множестве
$(x, y) = \overline{(y, x)}$
Важно: линейность по первому аргументу - везде
$(\lambda x, y) \overset{\mathbb{R}, C}{=} \lambda(x, y)$
Но:
$(x, \lambda y) = \lambda(x, y)$ в $\mathbb{R}$
$(x, \lambda y) = \overline{\lambda}(x, y)$ в C

Def. 1. Оператор $\mathcal{A}^*$ называется сопряженным для $\mathcal{A} : V \to V$, если
$(\mathcal{A}x, y) = (x, \mathcal{A}^* y)$

Def. 2. $\mathcal{A}^*$ сопряженный для $\mathcal{A}$, если $A^* = A^T$ в любой ортонормированном базисе
Def. 1. $\Longleftrightarrow$ **Def. 2.**
$(\mathcal{A}x, y) \overset{\text{на языке матриц}}{=\!=\!=\!=} (AX, Y) = (AX)^T \cdot Y = X^T \cdot A^T \cdot Y$
$\|$
$(x, \mathcal{A}^* y) = X^T \cdot (A^* Y) = (X^T A^*) \cdot Y = X^T \cdot A^T \cdot Y \Longrightarrow A^* = A^T$
<u>Lab.</u> Очевидно существование $\mathcal{A}^*$ $\forall \mathcal{A}$ (определяется в ортонормированном базисе действием $\mathcal{A}^T$)
Доказать единственность $\mathcal{A}^*$ рассмотреть от противного $(x, \mathcal{A}_1^* y) \neq (x, \mathcal{A}_2^* y))$
Свойства:
1) $\mathcal{I} = \mathcal{I}^*$ $\quad \square (\mathcal{I}x, y) = (x, y) = (x, \mathcal{I}y) \quad \square$
2) $(\mathcal{A} + \mathcal{B})^* = \mathcal{A}^* + \mathcal{B}^*$
3) $(\lambda \mathcal{A})^* = \lambda \mathcal{A}^*$
4) $(\mathcal{A}^*)^* = \mathcal{A}$
5) $(\mathcal{A}\mathcal{B})^* = \mathcal{B}^* \mathcal{A}^*$ (св-во транспонирования матриц)
или $((\mathcal{A}\mathcal{B})x, y) = (\mathcal{A}(\mathcal{B}x), y) = (\mathcal{B}x, \mathcal{A}^* y) = (x, \mathcal{B}^* \mathcal{A}^* y)$
6) $\mathcal{A}^*$ - линейный оператор $(\mathcal{A}x = x', \mathcal{A}y = y' \Longrightarrow \mathcal{A}(\lambda x + \mu y) = \lambda x' + \mu y')$
Можно использовать линейные свойства умножения матриц $A^*(\lambda X + \mu Y) = \lambda \mathcal{A}^* X + \mu \mathcal{A}^* Y$

2* Самосопряженный оператор

Def. $\mathcal{A}$ называется самосопряженным, если $\mathcal{A} = \mathcal{A}^*$
Следствие. $A^T = A \Longrightarrow$ матрица A симметричная
Свойства самосопряженных операторов:
1) $\mathcal{A} = \mathcal{A}^*$, $\lambda :$ $\mathcal{A}x = \lambda x (x \neq 0)$. Тогда, $\lambda \in \mathbb{R}$
$\square (\mathcal{A}x, y) = (\lambda x, y) = \lambda(x, y) \quad (x, \mathcal{A}^* y) = (x, \mathcal{A}y) = (x, \lambda y) \overset{\text{в } C}{=} \overline{\lambda}(x, y)$
$(\mathcal{A}x, y) = (x, \mathcal{A}y) \Longrightarrow \lambda(x, y) = \overline{\lambda}(x, y) \Longrightarrow \lambda = \overline{\lambda} \Longrightarrow \lambda \in \mathbb{R}$
$\square$
2) $\mathcal{A} = \mathcal{A}^*$, $\mathcal{A}x_1 = \lambda_1 x_1, \mathcal{A}x_2 = \lambda_2 x_2$ и $\lambda_1 \neq \lambda_2$
Тогда $x_1 \perp x_2$
$\square$ Хотим доказать, что $(x_1, x_2) = 0$, при том, что $x_{1,2} \neq 0$
$\lambda_1(x_1, x_2) = ({}_1 x_1, x_2) = (\mathcal{A}x_1, x_2) = (x_1, \mathcal{A}x_2) = (x_1, \lambda_2 x_2) = (x_1, x_2)\lambda_2$
Так как $\lambda_1 \neq \lambda_2$, то $(\lambda_1 - \lambda_2)(x_1, x_2) = 0 \Longrightarrow (x_1, x_2) = 0 \quad \square$

Th. Лемма. $\mathcal{A} = \mathcal{A}^*$, e - собственный вектор ($l_{\{e\}}$ - линейная оболочка e - инвариантное подпространство для $\mathcal{A}$)

$V_1 = \{x \in V \mid x \perp e\}$

Тогда V_1 - инвариантное для $\mathcal{A}$

□ Нужно доказать, что $\forall x \in V_1$ $\mathcal{A}x \in V_1$ и так как $x \in V_1 \mid x \perp e$, то покажем, что $\mathcal{A}x \perp e$

$(\mathcal{A}x, e) = (x, \mathcal{A}e) = (x, \lambda e) = \lambda(x, e) \overset{x \perp e}{=\!=} 0$

□

Th. $\mathcal{A} = \mathcal{A}^*$ ($\mathcal{A} : V^n \to V^n$), тогда $\exists e_1, \ldots, e_n$ - набор собственных векторов $\mathcal{A}$ и $\{e_i\}$ - ортонормированный базис

(другими словами: $\mathcal{A}$ - диагонализируем)

Наводящие соображения.

Ex. 1. $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I$

$\mathcal{I} x = x = 1 \cdot x, \quad \lambda_{1,2,3} = 1$

Здесь $U_{\lambda_{1,2,3}} = V^3$, $\{\overrightarrow{i}, \overrightarrow{j}, \overrightarrow{k}\}$ - базис из собственных векторов, ортонормированный

Ex. 2. $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathcal{O}$

$\mathcal{O}x = 0, \quad \lambda_{1,2,3} = 0$

И здесь $U_{\lambda_{1,2,3}} = V^3$, так как $0 \in U_\lambda$ и $\forall x$ $\mathcal{O}x = 0 \in U_\lambda$

Ex. 3. Поворот $\mathbb{R}^2$ на $\dfrac{\pi}{4}$

$T = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

$\begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} - \lambda & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} - \lambda \end{vmatrix} = \left(\dfrac{1}{\sqrt{2}} - \lambda\right)^2 + \dfrac{1}{2} = 0$ - вещественных корней нет

□ ⊐ e_1 - какой-либо собственный вектор $\mathcal{A}$ ...

Th. $\mathcal{A} : V^n \to V^n, \mathcal{A} = \mathcal{A}^* \implies \exists\{e_i\}_{i=1}^n, e_1$ - собственные вектора $\mathcal{A}$ и $\{e_i\}$ - ортонормированный базис

□ e_1 - собственный вектор $\mathcal{A}$

e_1 найдется, если $\mathcal{A}x = \lambda x$ имеет нетривиального решение $\iff \det(\mathcal{A} - \lambda I) = 0 \overset{\mathcal{A}\text{ - самосопр.}}{\implies} \exists \lambda \in \mathbb{R}$

Для вектора e_1 строим инвариантное подпространство $V_1 \perp e_1$ (см. лемму), $\dim V_1 = n - 1$

В подпространстве V_1 $\mathcal{A}$ действует как самосопряженный и имеет собственный вектор $e_2 \perp e_1$. Для e_2 строим $V_2 \perp e_2, e_1$

Затем, $V_3, V_4, V_5, \ldots$, в котором, найдя e_i, ортогональный всем предыдущим

Составили ортогональный базис из e_i, который можно нормировать

□

Nota. Чтобы упорядочить построение базиса, в котором V_i может брать $\max \lambda_i$

Nota. Из теоремы следует, что самосопряженный оператор диагонализируется: Σ алг. крат. $= n$ (степень уравнения), а Σ геом. крат. $= \dim\{e_1, \dots, _n\} = n$

Разложение самосопряж. оператора в спектр:

$x \in V^n \quad \{e_i\}_{i=1}^n$ - базис из собственных векторов $\mathcal{A}$ (ортонорм.)

$x = x_1e_1 + \dots + x_ne_n = (x, e_1)e_1 + \dots + (x, e_n)e_n = \sum\limits_{i=1}^n (x, e_i)e_i$

Def. Оператор $P_ix = (x, e_i)e_i$ называется проектором на одномерное пространство, порожденное e_i (линейная оболочка)

Свойства:

1) $P_i^2 = P_i$ (более того $P_i^m = P_i$)

2) $P_iP_j = 0$

3) $P_i = P_i^* \quad ((P_ix, y) \stackrel{?}{=} (x, P_iy)) \iff (P_ix, y) = ((x, e_i)e_i, y) = (x, e_i)(e_i, y) = (x, (y, e_i)e_i) = (x, P_iy)$

Итак, если $\mathcal{A} : V^n \to V^n$ - самосопряженный и $\{e_i\}$ - ортонормированный базис собственных векторов $\mathcal{A}$, то

$x = \sum\limits_{i=1}^n P_ix = \sum\limits_{i=1}^n (x, e_i)e_i$

$\mathcal{A}x \stackrel{y=\Sigma(y,e_i)e_i}{=} \sum\limits_{i=1}^n (\mathcal{A}x, e_i)e_i = \sum\limits_{i=1}^n (x, \mathcal{A}e_i)e_i = \sum\limits_{i=1}^n (x, \lambda_ie_i)e_i = \sum\limits_{i=1}^n \lambda_i(x, e_i)e_i = \sum\limits_{i=1}^n \lambda_iP_ix$

$\iff \mathcal{A} = \sum\limits_{i=1}^n \lambda_iP_i$ - спектральное разложение $\mathcal{A}$, спектр $= \{\lambda_1, \dots, \lambda_n \mid \lambda_i \leq \dots \leq \lambda_n\}$

Ex.

$y = y_1e_1 + y_2e_2 = (y, e_1)e_1 + (y, e_2)e_2 = (\mathcal{A}x, e_1)e_1 + (\mathcal{A}x, e_2)e_2 = \lambda_1x_1e_1 + \lambda_2x_2e_2$

2.9. Ортогональный оператор

Мет. Орт. оператор $T : V^n \to V^n \stackrel{def}{\iff} \forall$ о/н базиса матрица T - ортогональная $T^{-1} = T^T$

Nota. Иначе, T - ортогональный оператор $\iff T^{-1} = T^* \implies TT^* = I$

Def. T - ортог. оператор, если $(T_x, T_y) = (x, y)$

Следствие: $\|Tx\| = \|x\|$, то есть T сохраняет расстояние

Nota. Ранее в теореме об изменении матрицы A при преобразовании координат T - ортогональный оператор

Это необязательно, то есть можно переходить в другой произвольный базис (док-во теоремы позволяет)

Диагонализация самосопряженного оператора:

Дана матрица A_f

1) Находим $\lambda_1, \dots, \lambda_n$

2) Находим $e_1, \dots e_n$ - ортогональный базис собственных векторов

3) Составляем $T = \begin{pmatrix} e_{11} & \dots & e_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & \dots & e_{nn} \end{pmatrix}$ - матрица поворота базиса

4) Находим $T_{e\to f}A_f T_{f\to e} = A_e$ - диагональная

Таким образом диагонализация самосопряженного $\mathcal{A}$ - это нахождение композиции поворотов и симметрий, как приведение пространства к главным направлением

3. Билинейные и квадратичные формы

3.1. Билинейные формы

Def. $x, y \in V^n$ Отображение $\mathcal{B} : V^n \to \mathbb{R}$ (обозн. $\mathcal{B}(x, y)$) называется билинейной формой, если выполнены

1) $\mathcal{B}(\lambda x + \mu y, z) = \lambda\mathcal{B}(x, z) + \mu\mathcal{B}(y, z)$
2) $\mathcal{B}(x, \lambda y + \mu z) = \lambda\mathcal{B}(x, y) + \mu\mathcal{B}(x, z)$

Ex.
1) $\mathcal{B}(x, y) \overset{\text{в } E^n_{\mathbb{R}}}{=} (x, y)$
2) $\mathcal{B}(x, y) = P_y x$ - проектор x на y
Матрица Б.Ф.

Th. $\{e_i\}_{i=1}^n$ - базис V_n, $u, v \in V^n$. Тогда $\mathcal{B}(u, v) = \sum\limits_{j=1}^n \sum\limits_{i=1}^n b_{ij} u_i v_j$, где $b_{ij} \in \mathbb{R}$

$\square$ $\begin{matrix} u = u_1 e_1 + \dots + u_n e_n \\ v = v_1 e_1 + \dots + v_n e_n \end{matrix}$ $\mathcal{B}(u, v) = \mathcal{B}(\sum\limits_{i=1}^n u_i e_i, \sum\limits_{j=1}^n v_j e_j) = \sum\limits_{i=1}^n u_i \mathcal{B}(e_i, \sum\limits_{j=1}^n v_j e_j) = \sum\limits_{i=1}^n u_i (\sum\limits_{j=1}^n v_j \mathcal{B}(e_i, e_j)) \overset{\text{обозн. } \mathcal{B}(e_i,e_j)=b_{ij}}{=}$
$\sum\limits_{i=1}^n u_i \sum\limits_{j=1}^n v_j b_{ij} = \sum\limits_{i=1}^n \sum\limits_{j=1}^n u_i v_j b_{ij}$
$\square$

Nota. Составим матрицу из $\mathcal{B}(e_i, e_j)$

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix}$$

Def. Если
1) $\mathcal{B}(u, v) = \mathcal{B}(v, u)$, то $\mathcal{B}$ - симметричная
2) $\mathcal{B}(u, v) = -\mathcal{B}(v, u)$, то $\mathcal{B}$ - антисимметричная
3) $\mathcal{B}(u, v) = \overline{\mathcal{B}(v, u)}$, то $\mathcal{B}$ - кососимметричная (в C)

Def. $rang\mathcal{B}(u, v) \overset{def}{=} rangB$

Nota.
1) $\mathcal{B}$ называется невырожденной, если $rang\mathcal{B} = n$
2) $rang\mathcal{B}_e = rang\mathcal{B}_{e'}$ (e, e' - различные базисы V^n), то есть $rang\mathcal{B}$ инвариантно относительно преобразования $e \to e'$

Ex. $\mathcal{B}(u, v) \overset{\text{ск. пр.}}{=} (u, v)$
$\begin{matrix} u = u_1 e_1 + u_2 e_2 \\ v = v_1 e_1 + v_2 e_2 \end{matrix}$, тогда $\mathcal{B}(e_i, e_j) \overset{\text{об}}{==} b_{ij} = (e_i, e_j)$

Таким образом, $B = \begin{pmatrix} (e_1, e_1) & (e_1, e_2) \\ (e_2, e_1) & (e_2, e_2) \end{pmatrix}$ - матрица Грама

Ex. $\begin{matrix} u(t) = 1+3t \\ v(t) = 2-t \end{matrix}$, $\{e_i\} = (1,t)$, $\mathcal{B}(u,v) = (u,v) = \int_{-1}^{1} uvdt$

Тогда, $B = \begin{pmatrix} \int_{-1}^{1} dt & \int_{-1}^{1} tdt \\ \int_{-1}^{1} tdt & \int_{-1}^{1} t^2dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} \end{pmatrix}$

Nota. Особое значение имеют симметричные билинейные формы

Если рассмотреть матрицы симм. Б. Ф. как матрицу самосопряженного оператора, то можно найти базис (ортонормированный базис собственных векторов), в котором матрица Б. Ф. диагонализируется

Этот базис называется каноническим базисом билинейной формы

3.2. Квадратичные формы

Def. Квадратичной формой, порожденной Б. Ф. $\mathcal{B}(u,v)$, называется форма $\mathcal{B}(u,u)$

Ex. Поверхность

$u = (x,y), v = (x,y,z)$

$\mathcal{B}(u,u) = b_{11}u_1u_1 + b_{12}u_1u_2 + b_{21}u_2u_1 + b_{22}u_2u_2 = b_{11}x^2 + b_{12}xy + b_{21}xy + b_{22}y^2$

$\mathcal{B}(v,v) = \beta_{11}x^2 + \beta_{12}xy + \beta_{13}xz + \beta_{21}xy + \beta_{22}y^2 + \beta_{23}yz + \beta_{31}xz + \beta_{32}yz + \beta_{33}z^2$

Rem. Ранее уравнение поверхности второго порядка (без линейной группы, то есть сдвига)

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{23}yz + 2a_{13}xz + a_{33}z^2 = c$$

Nota. Заметим, что здесь коэфф. a_{ij} соответствуют матрице симметричной Б. Ф.:

$B(v,v) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix}$

Если диагонализировать $B(v,v)$, то приведем уравнение поверхности к каноническому виду:

$\mathcal{B}(v,v)_{\text{канон.}} = c_{11}x^2 + c_{22}y^2 + c_{33}z^2$

Поэтому квадратичная форма, соответствующая поверхности второго порядка, рассматривается, как форма, порожденная симметричной билинейной формой

Def. Положительно определенная форма

Nota. Можно говорить о положительно определенном операторе $\mathcal{A} : V^n \to V^n$

1) Оператор $\mathcal{A}$ называется положительно определенным, если

$\exists \gamma > 0 \mid \forall x \in V \quad (\mathcal{A}x, x) \geq \gamma \|x\|^2$

2) $\mathcal{A}$ называется положительным, если

$\forall x \in V,\ x \neq 0 \quad (\mathcal{A}x, x) > 0$

Th. 1), 2) $\Longleftrightarrow \forall \lambda_i$ - с. число $\mathcal{A}$, $\lambda_i > 0$

$\square \Longrightarrow \quad \lambda_i$ - с. число, e_i - соответствующий им с. вектора

$\forall x \in V \quad x = \sum\limits_{i=1}^{n} c_ie_i$

$(\mathcal{A}x,x) = (\sum\limits_{i=1}^n c_i \overbrace{\mathcal{A}e_i}^{\lambda_i e_i}, \sum\limits_{i=1}^n c_i e_i) = \sum\limits_{i=1}^n \lambda_i c_i^2 \geq \sum\limits_{i=1}^n \lambda_{\min} c_i^2 = \lambda_{\min} \sum\limits_{i=1}^n c_i^2 = \lambda_{\min}\|x\|^2$
Если $0 < \lambda_{\min} < \lambda_i, \lambda_i \neq \lambda_{\min}$, то $(\mathcal{A}x,x) > 0$
$\Longleftarrow \quad 1) \Longleftrightarrow \exists \gamma > 0 \mid (\mathcal{A}x,x) \geq \gamma\|x\|^2 \quad \forall x \in V$ в том числе $x = e_i \neq 0$
$(\mathcal{A}e_i, e_i) = \lambda_i(e_i,e_i) = \lambda_i > 0 \ \forall i$
□

Nota. $\det A$ инвариантен при замене базиса, $\det A = \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_n > 0$. Тогда $\exists \mathcal{A}^{-1}$

Th. Критерий Сильвестра

$\mathcal{A} : V^n \to V^n$ - положительно определен $\Longleftrightarrow \forall k = 1..n \ \Delta_k = \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$

□ $\Longrightarrow \quad \mathcal{A}$ - пол. опред.

$\mathcal{A}$ диагонализируется в базисе $\{e_1, \dots, e_n\}$ собственных векторов. Тогда, $\mathcal{A}$ диагонализируется в базисе $\{e_1, \dots, e_k\}$, $k \leq n$

$A_k = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \dots & a_{kk} \end{pmatrix} \quad \Delta_k = \det A_k \overset{inv}{=} \begin{vmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_k \end{vmatrix} > 0$

$\Longleftarrow$ ММИ
$\forall k = 1..n, \Delta_k > 0$
1) Для $k = 1 \quad \mathcal{A}$ - пол. опр.
2) $\mathcal{A}_{n-1}$ - пол. опр. $\Longrightarrow \mathcal{A}_n$ - пол. опр.
1) $\mathcal{A}x = a_{11}x \quad |a_{11}| > 0 \Longrightarrow \mathcal{A}$ - пол. опр.
2) $\mathcal{A}$ диагон. $\quad \mathcal{A}_e x = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{vmatrix} x = \sum\limits_{i=1}^{n-1} \lambda_i c_i e_i + \lambda_n c_n e_n \quad$ Для $i \leq n-1$ все $\lambda_i > 0$

$(\mathcal{A}x,x) = (\sum\limits_{i=1}^{n-1} \lambda_i c_i e_i + \lambda_n c_n e_n, \sum\limits_{i=1}^{n-1} c_i e_i) = \overbrace{\sum\limits_{i=1}^{n-1} \lambda_i c_i^2}^{>0} + \lambda_n c_n^2$ - знак зависит от λ_n
$\Delta_n = \underbrace{\lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{n-1}}_{>0} \cdot \lambda_n \Longrightarrow \lambda_n > 0 \Longrightarrow (\mathcal{A}x,x) > 0$
□

Ex. Поверхность: $x^2 + y^2 + z^2 = 1$

$\mathcal{B}(u,u) = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad \Delta_k = 1 > 0 \ \forall k$

Положительная определенность - наличие экстремума

Def. Оператор $\mathcal{A}$ называется отрицательно определенным, если $-\mathcal{A}$ - положительно определенный

Nota. Для $-\mathcal{A}$ работает критерий Сильвестра: $\Delta_k(-\mathcal{A}) = \begin{vmatrix} -a_{11} & \dots & -a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & \dots & -a_{nn} \end{vmatrix} = (-1)^k \Delta_k(\mathcal{A}) > 0$

Таким образом, $\mathcal{A}$ - отриц. опред. $\Longleftrightarrow \Delta_k$ чередует знаки

Nota. Аналогично операторы определяются положительно или отрицательно билинейные формы

$\mathcal{B}(u,v) = \sum\limits_{j=1}^{n}\sum\limits_{i=1}^{n} b_{ij}u_i v_j \overset{?}{=} \dots$ через оператор

Так как $\mathcal{B}(u,v)$ и $\mathcal{B}(u,u)$ - числа, то $\mathcal{B}$ - называется пол. опред., если $\mathcal{B}(u,v) > 0$

Nota. После приведения $\mathcal{B}(u,v)$ к каноническому виду, получаем

$\mathcal{B}(u,u)_{\text{канон.}} = \lambda_1 x_1^2 + \dots + \lambda_n x_n^2$

В общем случае λ_i любого знака

Но можно доказать, что количества $\lambda_i > 0, \lambda_j < 0, \lambda_k = 0$ постоянны по отношению к способу приведения к каноническому виду (т. н. закон инерции квадратичной формы)

4. Дифференциальные уравнения

4.1. Общие понятия

1* Постановка задачи

Pr. 1. Скорость распада радия в текущий момент времени t пропорциональна его наличному количеству Q. Требуется найти закон распада радия:

$$Q = Q(t),$$

если в начальный момент времени $t_0 = 0$ количество равнялось Q_0

Коэффициент пропорциональности k найден эмпирически.

Решение. Скорость распада.

$\dfrac{dQ(t)}{dt} = kQ$ - ищем $Q(t)$

$dQ(t) = kQdt$

$\underbrace{\dfrac{dQ(t)}{Q}}_{\text{содержит только } Q} = \underbrace{kdt}_{\text{содержит только } t}$ - «разделение переменных»

Внесем все в дифференциал:

$d\ln Q = kdt = dkt$

$d(\ln Q - kt) = 0$

Нашли семейство первообразных:

$\ln Q - kt = \tilde{C}$

$\ln Q = \tilde{C} + kt$

$Q = e^{\tilde{C}+kt} \overset{e^{\tilde{C}}=C}{=\!=} Ce^{kt}$

По смыслу $k < 0$, так как Q уменьшается. Обозначим $n = -k, n > 0$

Тогда $\boxed{Q(t) = Ce^{-nt}}$

Получили вид закона распада. Выбор константы C определен Н.У. (начальными условиями):

$t_0 = 0 \quad Q(t_0) = Q_0 = C$

Тогда, закон - $\boxed{Q^*(t) = Q_0 e^{-nt}}$

Nota. Оба закона: общий $Q(t) = Ce^{-nt}$ и частный $Q^*(t) = Q_0 e^{-nt}$ - являются решением дифференциального уравнения:
$Q'(t) = kQ$ (явный вид)
$d \ln Q(t) - kdt = 0$ (в дифференциалах)

Pr. 2 Тело массой m брошено вверх с начальной скоростью v_0. Нужно найти закон движения $y = y(t)$. Сопротивлением воздуха пренебречь.
По II закону Ньютона:
$m\overrightarrow{a} = m\overrightarrow{g}$
$\overrightarrow{a} = \overrightarrow{g}$
$\overrightarrow{a} = \overrightarrow{g}$
$a = \boxed{\dfrac{d^2y}{dt^2} = -g}$ - ДУ
<u>Решение.</u> $y''(t) = -g$
$(y'(t))' = -g$
$y'(t) = -\int g dt = -gt + C_1$
$y(t) = \int (-gt + C_1) dt = \boxed{-\dfrac{gt^2}{2} + C_1 t + C_2 = y(t)}$ - общий закон
$C_{1,2}$ ищем из Н.У.
В задаче нет условия для $y(t_0)$. Возьмем $y_0 = y(t_0) = 0$
Кроме того $y'(t_0) = v(t_0) = v_0$
Таким образом, $\begin{cases} y(t_0) = 0 \\ y'(t_0) = v_0 \end{cases}$
Найдем C_1: $y'(t_0) = y(0) = -gt_0 + C_1 = v_0 \quad C_1 = v_0$
Найдем C_2: $y(t_0) = y(0) = -\dfrac{gt^2}{2} + C_1 t + C_2 = C_2 = 0$
Частный закон: $\boxed{y^*(t) = v_0 t - \dfrac{gt^2}{2}}$

2* Основные определения

Def. 1. Уравнение $F(x, y(x), y'(x), \ldots, y^{(n)}(x)) = 0$ - называется обыкновенным ДУ n-ого порядка $(*)$

Ex. $Q' + nQ = 0$ и $y'' + g = 0$

Def. 2. Решением ДУ $(*)$ называется функция $y(x)$, которая при подстановке обращает $(*)$ в тождество

Def. 2'. Если $y(x)$ имеет неявное задание $\Phi(x, y(x)) = 0$, то $\Phi(x, y)$ называется интегралом уравнения $(*)$

Nota. Разделяют общее решение ДУ - семейство функций, при этом каждое из них - решение; и частное решение - отдельная функция

Def. 3. Кривая с уравнением $y = y(x)$ или $\Phi(x, y(x)) = 0$ называют интегральной кривой

Def. 4. $\begin{cases} y(x_0) = y_0 \\ \vdots \\ y^{(n-1)}(x_0) = y_0^{(n-1)} \end{cases}$ - система начальных условий $(**)$

Тогда $\begin{cases} (*) \\ (**) \end{cases}$ - задача Коши (ЗК)

Nota. Задача Коши может не иметь решений или иметь множество решений

Th. $y' = f(x, y)$ - ДУ
$M_0(x_0, y_0) \in D$ - точка, принадлежащая ОДЗ
Если $f(x, y)$ и $\dfrac{\partial f}{\partial y}$ непрерывны в M_0, то ЗК
$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$
имеет единственное решение $\varphi(x, y) = 0$, удовлетворяющее Н.У. (без док-ва)

Nota. Преобразуем ДУ: $\underbrace{y' - f(x, y)}_{F(x, y(x), y'(x))} = 0$
См. определения обыкн. и особых точек

Def. 5. Точки, в которых нарушаются условия теоремы называются особыми, а решения, у которых каждая точка особая, называются особыми

Def. 6. Общим решением ДУ $(*)$ называется $y = f(x, C_1, C_2, \ldots, C_n)$

Nota. $\Phi(x, y(x), C_1, \ldots, C_n) = 0$ - общий интеграл

Def. 7. Решением $(*)$ с определенными значениями $C_1^*, \ldots, C_n^*$ называется частным

Nota. Форма записи:
Разрешенное относительно производной $y' = f(x, y)$
Сведем к виду: $\dfrac{dy}{dx} = \dfrac{P(x, y)}{-Q(x, y)} \Longrightarrow -Q(x, y)dy = P(x, y)dx \Longrightarrow$
$\boxed{P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0}$ - форма в дифференциалах