

# Лекции по предмету Линейная алгебра и геометрия

Группа лектория ФКН ПМИ 2015-2016

Анастасия Иовлева

Ксюша Закирова

Руслан Хайдуров

2016 год

## Содержание

<b>1</b>	<b>Лекция 15 от 11.01.2016</b>	<b>2</b>
1.1	Скаляры. Поля . . . . .	2
1.2	Поле комплексных чисел . . . . .	2
1.3	Геометрическая модель поля $\mathbb{C}$ . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Лекция 16 от 18.01.2016</b>	<b>6</b>
2.1	Комплексные числа (продолжение) . . . . .	6
2.2	Корни из комплексного числа . . . . .	7
2.3	Решение квадратных уравнений с комплексными коэффициентами . . . . .	8
2.4	Векторные пространства над произвольным полем . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Лекция 17 от 25.01.2016</b>	<b>9</b>
3.1	Овеществление и комплексификация . . . . .	9
3.2	Сумма подпространств . . . . .	10
3.3	Переход к новому базису . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Лекция 18 от 29.01.2016</b>	<b>12</b>
4.1	Матрица перехода и переход к новому базису . . . . .	12
4.2	Линейные отображения . . . . .	13
4.3	Изоморфизм . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Лекция 19 от 01.02.2016</b>	<b>16</b>
5.1	Изоморфизм (продолжение) . . . . .	16
5.2	Матрицы линейных отображений . . . . .	17

<b>6 Лекция 20 от 08.02.2016</b>	<b>20</b>
6.1 Линейные отображения (продолжение)	20
6.2 Линейные операторы	23
<b>7 Лекция 21 от 15.02.2016</b>	<b>24</b>
7.1 Инвариантность и обратимость	24
7.2 Собственные векторы и собственные значения	25
7.3 Диагонализуемость	26
7.4 Собственное подпространство	27
<b>8 Лекция 22 от 22.02.2016</b>	<b>28</b>
8.1 Деление многочленов с остатком	28
8.2 Собственные значения и характеристический многочлен	29
8.3 Геометрическая и алгебраическая кратности	29
8.4 Сумма и прямая сумма нескольких подпространств	30
<b>9 Лекция 23 от 29.02.2016</b>	<b>32</b>
9.1 Сумма собственных подпространств	32
9.2 Диагонализируемость	32
9.3 Инвариантные подпространства в $\mathbb{R}^n$	33
9.4 Корневые векторы и корневые подпространства	34
<b>10 Лекция 24 от 14.03.2016</b>	<b>36</b>
10.1 Корневые подпространства	36
10.2 Жордановы клетки	39
<b>11 Лекция 25 от 21.03.2016</b>	<b>40</b>
11.1 Жорданова нормальная форма	40
11.2 Линейные функции на векторном пространстве	41
11.3 Билинейные функции на векторном пространстве	42
<b>12 Лекция 26 от 06.04.2016</b>	<b>44</b>
12.1 Матрицы билинейных функций	44
12.2 Симметричные билинейные функции	45
12.3 Квадратичные функции	46
<b>13 Лекция 27 от 13.04.2016</b>	<b>48</b>
13.1 Привидение к каноническому и нормальному виду	48
13.2 Закон инерции, индексы инерции	49

<b>14 Лекция 28 от 19.04.2016</b>	<b>51</b>
14.1 Ортогонализация . . . . .	51
14.2 Теорема Якоби и критерий Сильвестра . . . . .	52
14.3 Евклидовы пространства. Основные понятия . . . . .	53
<b>15 Лекция 29 от 27.04.2016</b>	<b>55</b>
15.1 Ортогональные дополнения . . . . .	55
15.2 Ортогональные и ортонормированные базисы. Свойства . . . . .	56
15.3 Расстояния в евклидовых пространствах . . . . .	57
<b>16 Лекция 30 от 11.05.2016</b>	<b>59</b>
16.1 $N$ -мерные параллелепипеды в евклидовых пространствах . . . . .	59
16.2 Изоморфизм евклидовых пространств . . . . .	60
16.3 Линейные операторы в евклидовых пространствах . . . . .	61
<b>17 Лекция 31 от 17.05.2016</b>	<b>63</b>
17.1 Самосопряжённые линейные операторы (продолжение) . . . . .	63
17.2 Ортогональные линейные операторы . . . . .	65

# Лекция 15 от 11.01.2016

## Скаляры. Поля

Для начала вспомним, что такое *векторное пространство* — это множество, на котором введены операции сложения, умножения на скаляр и в котором будут выполняться восемь аксиом (см. 1 семестр). Но что такое скаляр?

**Определение.** Скаляры — это элементы некоторого фиксированного поля.

**Определение.** Полем называется множество  $F$ , на котором заданы две операции — «сложение»  $(+)$  и «умножение»  $(\cdot)$ ,

$$F \times F \rightarrow F \Rightarrow \begin{aligned} + : (a, b) &\mapsto a + b \\ \cdot : (a, b) &\mapsto a \cdot b \end{aligned}$$

удовлетворяющие следующим свойствам («аксиомам поля»):  $\forall a, b, c \in F$

1.  $a + b = b + a$  (коммутативность по сложению);
2.  $(a + b) + c = a + (b + c)$  (ассоциативность по сложению);
3.  $\exists 0 \in F : 0 + a = a + 0 = a$  (существование нулевого элемента);
4.  $\exists -a \in F : a + (-a) = (-a) + a = 0$  (существование противоположного элемента);
5.  $a(b + c) = ab + ac$  (дистрибутивность; связь между сложением и умножением);
6.  $ab = ba$  (коммутативность по умножению);
7.  $(ab)c = a(bc)$  (ассоциативность по умножению);
8.  $\exists 1 \in F \setminus \{0\} : 1 \cdot a = a \cdot 1 = a$  (существование единицы);
9.  $a \neq 0 \Rightarrow \exists a^{-1} \in F : a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1$  (существование обратного элемента).

**Пример.**

- $\mathbb{Q}$  — рациональные числа;
- $\mathbb{R}$  — вещественные числа;
- $\mathbb{C}$  — комплексные числа;
- $F_2 = \{0, 1\}$ , при сложении и умножении по модулю 2.

## Поле комплексных чисел

Поле действительных чисел  $\mathbb{R}$  плохо тем, что в нем уравнение  $x^2 + 1 = 0$  не имеет решения. Отсюда возникает идея определить поле, удовлетворяющее следующим требованиям:

(T1) новое поле содержит  $\mathbb{R}$ ;

(T2) уравнение  $x^2 + 1 = 0$  имеет решение.

Давайте формально построим такое поле.

**Определение.** Полем  $\mathbb{C}$  комплексных чисел называется множество  $\{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$ , на котором заданы операции сложения:  $(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2)$  и умножения:  $(a_1, b_1) \cdot (a_2, b_2) = (a_1 a_2 - b_1 b_2, a_1 b_2 + b_1 a_2)$ .

**Предложение.**  $\mathbb{C}$  и впрямь является полем.

*Доказательство.* Операции сложения и умножения введены, осталось только проверить выполнение всех аксиом.

1. очевидно, так как сложение идет поэлементно;
2. также очевидно;
3.  $0 = (0, 0)$ ;
4.  $-(a, b) = (-a, -b)$ ;
5. почти очевидно (т.е. прямая проверка);
6. ясно (тоже прямая проверка);
7. проверим:

$$\begin{aligned} ((a_1, b_1)(a_2, b_2))(a_3, b_3) &= (a_1 a_2 - b_1 b_2, a_1 b_2 + b_1 a_2)(a_3, b_3) = \\ &= (a_1 a_2 a_3 - b_1 b_2 b_3 - a_1 b_2 b_3 - b_1 a_2 b_3, a_1 a_2 b_3 - b_1 b_2 b_3 + a_1 b_2 a_3 + b_1 a_2 a_3) = \\ &= (a_1, b_1)(a_2 a_3 - b_2 b_3, a_2 b_3 + b_2 a_3) = (a_1, b_1)((a_2, b_2)(a_3, b_3)); \end{aligned}$$

8.  $1 = (1, 0)$ ;
9.  $(a, b) \neq 0 \Leftrightarrow a^2 + b^2 \neq 0 \rightarrow (a, b)^{-1} = \left(\frac{a}{a^2+b^2}, \frac{-b}{a^2+b^2}\right)$ .

□

Осталось только проверить, правда ли введенное поле  $\mathbb{C}$  удовлетворяет нашим требованиям:

(Т1) Заметим, что в подмножестве  $\mathbb{C}$ , состоящим из элементов вида  $(a, 0)$  операции сложения и умножения будут работать как в поле вещественных чисел.

$$\begin{aligned} (a, 0) + (b, 0) &= (a + b, 0) \\ (a, 0) \cdot (b, 0) &= (ab, 0) \end{aligned}$$

Следовательно, отображение  $a \mapsto (a, 0)$  отождествляет  $\mathbb{R}$  с этим подмножеством, то есть  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ . Что нам и требуется.

(Т2) Примем  $i = (0, 1)$ . Тогда  $i^2 = (0, 1) \cdot (0, 1) = (-1, 0) = -1$ . Итого, требование выполнено.

Однако запись комплексных чисел в виде упорядоченной пары  $(a, b)$  не очень удобна и громоздка. Поэтому преобразуем запись следующим образом:

$$(a, b) = (a, 0) + (0, b) = (a, 0) + (b, 0) \cdot (0, 1) = a + bi.$$

Тем самым мы получили реализацию поля  $\mathbb{C}$  комплексных чисел как множества  $\{a + bi \mid a, b \in \mathbb{R}, i^2 = -1\}$ , с обычным сложением и умножением.

**Определение.** Запись  $z = a + bi$  называется алгебраической формой комплексного числа  $z \in \mathbb{C}$ .

$a = \operatorname{Re} z$  — действительная часть числа  $z$ .

$b = \operatorname{Im} z$  — мнимая часть числа  $z$ .

**Определение.** Числа вида  $z = bi$  (т.е.  $\operatorname{Re} z = 0$ ) называются чисто мнимыми.

**Определение.** Отображение  $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} : a + bi \mapsto a - bi$  называется (комплексным) сопряжением. Само число  $\bar{z} = a - bi$  называется (комплексно) сопряженным к числу  $z = a + bi$ .

**Лемма.** Для любых двух комплексных чисел  $z, w \in \mathbb{C}$  выполняется, что

$$1. \overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w};$$

$$2. \overline{zw} = \bar{z} \cdot \bar{w}.$$

*Доказательство.* Пусть  $z = a + bi$ , а  $w = c + di$ .

$$1. \bar{z} + \bar{w} = a - bi + c - di = (a + c) - (b + d)i = \overline{z + w}$$

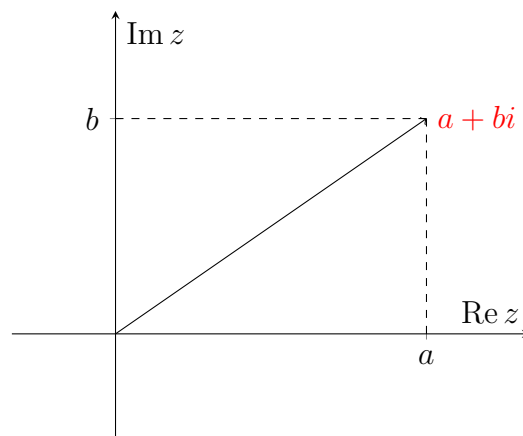
$$2. \bar{z} \cdot \bar{w} = (a - bi)(c - di) = ac - adi - bci + bdi^2 = (ac - bd) - (ad + bc)i = \overline{zw}$$

□

**Замечание.** Равенство  $z = \bar{z}$  равносильно равенству  $\operatorname{Im} z = 0$ , то есть  $z \in \mathbb{R}$ .

## Геометрическая модель поля $\mathbb{C}$

Заметим, что поле комплексных чисел  $\mathbb{C} = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$  равно  $\mathbb{R}^2$ . Следовательно, комплексные числа можно представить как точки на действительной плоскости  $\mathbb{R}^2$ , или сопоставить их векторам.



В таком представлении сложение комплексных чисел сопоставляется со сложением векторов, а сопряжение — с отражением относительно оси  $Ox(\operatorname{Re} z)$ .

**Определение.** Модулем комплексного числа  $z = a + bi$  называется длина соответствующего вектора. Обозначение:  $|z|$ ;  $|a + bi| = \sqrt{a^2 + b^2}$ .

Свойства модуля:

1.  $|z| \geq 0$ , причем  $|z| = 0$  тогда и только тогда, когда  $z = 0$ ;
2.  $|z + w| \leq |z| + |w|$  — неравенство треугольника;
3.  $z \cdot \bar{z} = |z|^2$ ;

*Доказательство.*  $(a + bi)(a - bi) = a^2 - (bi)^2 = a^2 + b^2 = |z|^2$ . □

4.  $|zw| = |z| \cdot |w|$ ;

*Доказательство.* Возведем в квадрат.

$$|z|^2 \cdot |w|^2 = z\bar{z}w\bar{w} = (zw)\overline{zw} = zw\bar{z}\bar{w} = |zw|^2$$

□

**Замечание.** Из свойства 3 следует, что при  $z \neq 0$  выполняется:

$$z^{-1} = \frac{\bar{z}}{|z|^2}$$

$$(a + bi)^{-1} = \frac{1}{a + bi} = \frac{a - bi}{a^2 + b^2}.$$

**Определение.** Аргументом комплексного числа  $z \neq 0$  называется всякий угол  $\varphi$  такой что

$$\cos \varphi = \frac{a}{|z|} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{|z|} = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Неформально говоря, аргумент  $z$  — это угол между осью  $Ox$  и соответствующим вектором.

**Замечание.**

1. Аргумент определен с точностью до  $2\pi$ .
2. Аргумент  $z = 0$  не определен.

Для  $z \neq 0$  введем множество  $\text{Arg } z = \{\text{множество всех аргументов } z\}$  — *большой аргумент*. Также введем *малый аргумент*  $\arg z$  — это такой  $\varphi \in \text{Arg } z$ , который удовлетворяет условию  $0 \leq \varphi < 2\pi$  и, следовательно, определен однозначно.

Используя аргумент, можно представить комплексное число следующим образом:

$$\begin{cases} a = |z| \cos \varphi \\ b = |z| \sin \varphi \end{cases} \Rightarrow z = a + bi = |z| \cos \varphi + i|z| \sin \varphi = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

**Определение.** Запись  $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$  называется *тригонометрической формой комплексного числа*  $z$ .

**Замечание.**

$$r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1) = r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) \Leftrightarrow \begin{cases} r_1 = r_2 \\ \varphi_1 = \varphi_2 + 2\pi n, \quad n \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

# Лекция 16 от 18.01.2016

Вспомним предыдущую лекцию и кое-что дополним

**Замечание.**

1. Элемент  $0$  — единственный.
2. И элемент  $-a$  единственный.
3. Даже элемент  $1$  единственный.
4. Как это ни удивительно, но  $a^{-1}$  тоже единственный.

Легко увидеть, что пункты 2 и 4 доказываются одинаково с точностью до замены операции, как и пункты 1 и 3.

*Доказательство.* Докажем пункт 3. Если существует  $1'$  — еще одна единица, тогда по аксиомам  $1' = 1' \cdot 1 = 1$ .

Докажем теперь пункт 4. Пусть  $b$  и  $c$  таковы, что  $b \neq c$  и  $ba = ab = ac = ca = 1$ . Тогда

$$bac = (ba)c = b(ac) = 1 \cdot c = c = 1 \cdot b = b$$

То есть  $b = c$ . □

## Комплексные числа (продолжение)

**Предложение.** Пусть  $z_1 = |z_1|(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)$ ,  $z_2 = |z_2|(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)$ . Тогда

$$z_1 z_2 = |z_1| |z_2| (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2))$$

Иными словами, при умножении комплексных чисел их модули перемножаются, а аргументы складываются.

*Доказательство.* Просто раскроем скобки и приведём подобные.

$$\begin{aligned} z_1 z_2 &= |z_1| |z_2| (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + i (\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2 \sin \varphi_1)) = \\ &= |z_1| |z_2| (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)) \end{aligned}$$

□

**Следствие.**  $\frac{z_1}{z_2} = \frac{|z_1|}{|z_2|} (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2))$

**Следствие (Формула Муавра).** Пусть  $z = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ . Тогда:

$$z^n = |z|^n (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)) \quad \forall n \in \mathbb{Z}.$$

**Замечание.** В комплексном анализе функция  $\exp x: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  доопределяется до  $\exp z: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  следующим образом:

$$\exp z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}.$$

И тогда оказывается, что  $\exp z$  обладает теми же свойствами, кроме того:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad \forall \varphi \in \mathbb{C}.$$



Всякое  $z \in \mathbb{C}$  можно представить в виде  $z = |z|e^{i\varphi}$ , где  $\varphi \in \text{Arg}(z)$ . Тогда формула Муавра приобретает совсем очевидный вид:

$$|z_1|e^{i\varphi_1} \cdot |z_2|e^{i\varphi_2} = |z_1||z_2|e^{i(\varphi_1+\varphi_2)}.$$

**Замечание.** Отображение  $R_\varphi: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, z \rightarrow ze^{i\varphi}, \varphi \in \mathbb{R}$  определяет поворот на угол  $\varphi$  вокруг 0.

## Корни из комплексного числа

Пусть  $n \in \mathbb{N}$  и  $n \geq 2$ .

**Определение.** Корнем  $n$ -й степени из числа  $z$  называется всякое  $w \in \mathbb{C}: w^n = z$ . То есть

$$\sqrt[n]{z} = \{w \in \mathbb{C} \mid w^n = z\}.$$

Если  $z = 0$ , то  $|z| = 0$ , а значит  $|w| = 0, w = 0$ . Получается, 0 — единственное комплексное число, у которого корень определён однозначно.

Далее рассмотрим случай  $z \neq 0$ .

$$\begin{aligned} z &= |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi) \\ w &= |w|(\cos \psi + i \sin \psi) \end{aligned}$$

$$z = w^n \Leftrightarrow \begin{cases} |z| = |w|^n \\ n\psi \in \text{Arg}(z) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} |w| = \sqrt[n]{|z|} \\ n\psi = \varphi + 2\pi k, \quad k \in \mathbb{Z} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} |w| = \sqrt[n]{|z|} \\ \psi = \frac{\varphi + 2\pi k}{n}, \quad k \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

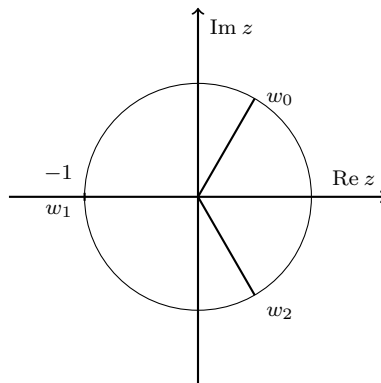
С точностью до кратного  $2\pi$  различные значения в формуле  $\psi = \frac{\varphi + 2\pi k}{n}$  получаются при  $k = 0, 1, \dots, n-1$ . Значит  $z$  имеет ровно  $n$  корней  $n$ -й степени.

$$\sqrt[n]{z} = \left\{ |z| \left( \cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right) \mid k = 0, \dots, n-1 \right\}$$

**Замечание.** Точки из множества  $\sqrt[n]{z}$  при  $z \neq 0$  лежат в вершинах правильного  $n$ -угольника, вписанного в окружность радиуса  $\sqrt[n]{|z|}$ .

**Пример.**  $z = -1 = \cos \pi + i \sin \pi$

$$\sqrt[3]{z} = \left\{ \cos \frac{\pi}{3} + i \sin \frac{\pi}{3}; \cos \pi + i \sin \pi; \cos \frac{5\pi}{3} + i \sin \frac{5\pi}{3} \right\}$$



# Решение квадратных уравнений с комплексными коэффициентами

Пусть дано квадратное уравнение  $az^2 + bz + c = 0$ , где  $a, b, c \in \mathbb{C}$  и  $a \neq 0$ . Тогда имеем:

$$\begin{aligned} z^2 + \frac{b}{a}z + \frac{c}{a} &= 0 \\ z^2 + 2\frac{b}{2a}z + \frac{b^2}{4a^2} + \frac{c}{a} - \frac{b^2}{4a^2} &= 0 \\ \left(z + \frac{b}{2a}\right)^2 &= \frac{b^2 - 4ac}{4a^2} \\ z + \frac{b}{2a} &\in \sqrt{\frac{b^2 - 4ac}{4a^2}} = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{aligned}$$

То есть все решения — это  $z_1 = \frac{-b + d_1}{2a}$ ,  $z_2 = \frac{-b + d_2}{2a}$ , где  $\{d_1, d_2\} = \sqrt[2]{b^2 - 4ac}$ . В частности, квадратное уравнение всегда имеет комплексный корень, а при  $b^2 - 4ac \neq 0$  два корня.

**Теорема** (Основная теорема алгебры). *Всякий многочлен  $P(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0$  степени  $n$ , где  $n \geq 1$ ,  $a_n \neq 0$ , и  $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{C}$  имеет корень.*

## Векторные пространства над произвольным полем

И снова вспомним, что такое векторное пространство:

- некоторое множество  $V$ ;
- есть операция сложения  $V \times V \rightarrow V$ ;
- есть операция умножения на скаляр  $F \times V \rightarrow V$ ;
- выполняются 8 аксиом.

Все основные понятия и результаты теории векторных пространств из прошлого полугодия можно перенести на случай пространства над произвольным полем  $F$  без изменений.

**Пример.** Пусть  $V$  — векторное пространство над полем из двух элементов,  $\dim V = n$ . Тогда  $|V| = 2^n$ . Действительно, каждое конечномерное пространство обладает базисом (в данном случае  $e_1, \dots, e_n$ ). Тогда  $V = \{k_1 e_1 + k_2 e_2 + \dots + k_n e_n \mid k_i \in F\}$ . Но очень легко заметить, что всего таких линейных комбинаций  $2^n$ .

# Лекция 17 от 25.01.2016

## Овеществление и комплексификация

Пусть  $V$  — векторное пространство над  $\mathbb{C}$ .

**Определение.** Овеществление пространства  $V$  — это то же пространство  $V$ , рассматриваемое как пространство над  $\mathbb{R}$ . Обозначение:  $V_{\mathbb{R}}$ .

Операция умножения на элементы  $\mathbb{R}$  в  $V$  уже есть, так как  $\mathbb{R}$  — подполе в  $\mathbb{C}$ .

**Пример.**  $\mathbb{C}_{\mathbb{R}} = \mathbb{R}^2$ .

**Предложение.**  $V$  — векторное пространство над  $\mathbb{C}$ ,  $\dim V < \infty$ . Тогда  $\dim V_{\mathbb{R}} = 2 \dim V$ .

*Доказательство.* Пусть  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $V$ . Тогда  $V = \{z_1 e_1 + \dots + z_n e_n \mid z_k \in \mathbb{C}\}$ , причём такая запись единственная в силу определения базиса. Пусть  $z_k = a_k + ib_k$ , причём такая запись тоже единственная. Тогда будем иметь

$$\begin{aligned} V &= \{(a_1 + ib_1)e_1 + \dots + (a_n + ib_n)e_n \mid a_k, b_k \in \mathbb{R}\} = \\ &= \{a_1 e_1 + \dots + a_n e_n + b_1 i e_1 + \dots + b_n i e_n \mid a_k, b_k \in \mathbb{R}\} \end{aligned}$$

И причём такая запись тоже единственная. Выходит, что  $e_1, e_2, \dots, e_n, i e_1, i e_2, \dots, i e_n$  — базис в  $V_{\mathbb{R}}$ , в котором  $2n = 2 \dim V$  элементов.  $\square$

**Определение.** Комплексификация пространства  $W$  — это множество  $W \times W = W^{\mathbb{C}} = \{(u, v) \mid u, v \in W\}$  с операциями  $(u_1, v_1) + (u_2, v_2) = (u_1 + u_2, v_1 + v_2)$ ,  $(a, b)(u, v) = (au - bv, av + bu)$ .

**Пример.**  $\mathbb{R}^{\mathbb{C}} = \mathbb{R}$ .

**Утверждение.** В нём выполняются все 8 аксиом векторного пространства над  $\mathbb{C}$ .

$W$  отождествляется подмножеством  $\{(u, 0) \mid u \in W\}$ . Действительно

$$w \in W \Leftrightarrow (w, 0) \in W^{\mathbb{C}}; \quad i(w, 0) = (0, w) \in W^{\mathbb{C}}$$

В итоге  $\forall (u, v) \in W^{\mathbb{C}}$  представим в виде

$$(u, v) = (u, 0) + (0, v) = (u, 0) + i(v, 0) = u + iv$$

То есть  $W^{\mathbb{C}} = \{u + iv \mid u, v \in W\}$ .

**Предложение.**  $\dim W^{\mathbb{C}} = \dim W$

**Замечание.** Здесь  $W^{\mathbb{C}}$  — пространство над  $\mathbb{C}$ , а  $W$  — над  $\mathbb{R}$ .

*Доказательство.* Пусть  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $W$ . Тогда

$$\begin{aligned} W^{\mathbb{C}} &= \{(u, v) \mid u, v \in W\} = \{(a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots + a_n e_n, b_1 e_1 + b_2 e_2 + \dots + b_n e_n) \mid a_k, b_k \in \mathbb{R}\} = \\ &= \{(a_1 e_1, b_1 e_1) + \dots + (a_n e_n, b_n e_n)\} = \{(a_1 + ib_1)e_1 + \dots + (a_n + ib_n)e_n\} = \\ &= \{z_1 e_1 + \dots + z_n e_n \mid z_k \in \mathbb{C}\} \end{aligned}$$

То есть выходит, что  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $W^{\mathbb{C}}$ .  $\square$

# Сумма подпространств

Пусть  $V$  — конечномерное векторное пространство, а  $U$  и  $W$  — подпространства (в качестве упражнения лектор предлагает доказать, что их пересечение — тоже подпространство).

**Определение.** Сумма подпространств  $U$  и  $W$  — это множество.

$$U + W = \{u + w \mid u \in U, w \in W\}$$

**Замечание.**  $\dim(U \cap W) \leq \dim U \leq \dim(U + W)$

**Пример.** Двумерные плоскости в пространстве  $\mathbb{R}^3$  содержат общую прямую.

**Теорема.**  $\dim(U \cap W) = \dim U + \dim W - \dim(U + W)$

*Доказательство.* Положим  $p = \dim(U \cap W)$ ,  $k = \dim U$ ,  $m = \dim W$ . Выберем базис  $a = \{a_1, \dots, a_p\}$  в пересечении. Его можно дополнить до базиса  $W$  и до базиса  $U$ . Значит  $\exists b = \{b_1, \dots, b_{k-p}\}$  такой, что  $a \cup b$  — базис в  $U$  и  $\exists c = \{c_1, \dots, c_{m-p}\}$  такой, что  $a \cup c$  — базис в  $W$ .

Докажем, что  $a \cup b \cup c$  — базис в  $U + W$ .

Во-первых, докажем, что  $U + W$  порождается множеством  $a \cup b \cup c$ .

$$\left. \begin{array}{l} v \in U + W \Rightarrow \exists u \in U, w \in W: v = u + w \\ u \in U = \langle a \cup b \rangle \subset \langle a \cup b \cup c \rangle \\ w \in W = \langle a \cup c \rangle \subset \langle a \cup b \cup c \rangle \end{array} \right| \Rightarrow v = u + w \in \langle a \cup b \cup c \rangle \Rightarrow U + W = \langle a \cup b \cup c \rangle$$

Во-вторых, докажем линейную независимость векторов из  $a \cup b \cup c$ .

Пусть скаляры  $\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_{k-p}, \gamma_1, \dots, \gamma_{m-p}$  таковы, что:

$$\begin{aligned} \underbrace{\alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_p a_p}_x + \underbrace{\beta_1 b_1 + \dots + \beta_{k-p} b_{k-p}}_y + \underbrace{\gamma_1 c_1 + \dots + \gamma_{m-p} c_{m-p}}_z &= 0 \\ x + y + z &= 0 \\ z &= -x - y \\ z &\in W \\ -x - y &\in U \cap W \\ \Rightarrow \exists \lambda_1, \dots, \lambda_p \in F: z &= \lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_p a_p \end{aligned}$$

Тогда  $\lambda_1 a_1 + \dots + \lambda_p a_p - \gamma_1 c_1 - \dots - \gamma_{m-p} c_{m-p} = 0$ . Но  $a \cup c$  — базис  $W$ . Следовательно,  $\lambda_1 = \dots = \lambda_p = \gamma_1 = \dots = \gamma_{m-p} = 0$ . Но тогда  $0 = x + y = \alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_p a_p + \beta_1 b_1 + \dots + \beta_{k-p} b_{k-p}$ . Но  $a \cup b$  — базис  $U$   $\Rightarrow \alpha_1 = \dots = \alpha_p = \beta_1 = \dots = \beta_{k-p} = 0$ . Итого, все коэффициенты равны нулю и линейная независимость тем самым доказана. То есть  $a \cup b \cup c$  — базис  $U + W$ .

$$\begin{aligned} \dim(U + W) &= |a \cup b \cup c| = |a| + |b| + |c| = p + k - p + m - p = k + m - p = \\ &= \dim U + \dim W - \dim(U \cap W) \end{aligned}$$

□

**Определение.** Если  $U \cap W = \{0\}$ , то  $U + W$  называется прямой суммой.

**Следствие.** В таком случае  $\dim(U + W) = \dim U + \dim W$ .

**Пример.**  $U$  — плоскость,  $W$  — прямая в  $\mathbb{R}^3$ .

## Переход к новому базису

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $\dim V = n$ ,  $e_1, \dots, e_n$  — базис. То есть

$$\forall v \in V \quad \exists! v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n,$$

где  $x_1, \dots, x_n \in F$  — координаты вектора  $v$  в базисе  $(e_1, \dots, e_n)$ . Пусть также есть базис  $e'_1, \dots, e'_n$ :

$$\begin{aligned} e'_1 &= c_{11}e_1 + c_{21}e_2 + \dots + c_{n1}e_n \\ e'_2 &= c_{12}e_1 + c_{22}e_2 + \dots + c_{n2}e_n \\ &\vdots \\ e'_n &= c_{1n}e_1 + c_{2n}e_2 + \dots + c_{nn}e_n \end{aligned}$$

Обозначим матрицу  $C = (c_{ij})$ . Тогда можно переписать  $(e'_1, \dots, e'_n)$  как  $(e_1, \dots, e_n) \cdot C$ .

**Предложение.**  $e'_1, \dots, e'_n$  образуют базис тогда и только тогда, когда  $\det C \neq 0$ .

*Доказательство.*

$[\Rightarrow]$   $e'_1, \dots, e'_n$  — базис, а значит  $\exists C' \in M_n$ :

$$\begin{aligned} (e_1, \dots, e_n) &= (e'_1, \dots, e'_n) C' = (e_1, \dots, e_n) C' C \\ E &= C C' \\ C' &= C^{-1} \Leftrightarrow \exists C^{-1} \Leftrightarrow \det C \neq 0 \end{aligned}$$

$[\Leftarrow]$   $\det C \neq 0 \Rightarrow \exists C^{-1}$ . Покажем, что  $e'_1, \dots, e'_n$  в таком случае линейно независимы. Пусть  $x_1 e'_1 + x_2 e'_2 + \dots + x_n e'_n = 0$ . Тогда можно записать

$$\begin{aligned} (e'_1, e'_2, \dots, e'_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} &= 0 \\ (e_1, \dots, e_n) C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} &= 0 \end{aligned}$$

Поскольку  $(e_1, \dots, e_n)$  — базис, то  $C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = 0$ . Умножая слева на обратную матрицу, получаем, что  $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$

□

# Лекция 18 от 29.01.2016

## Матрица перехода и переход к новому базису

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $\dim V = n$ , вектора  $e_1, \dots, e_n$  — базис, а  $e'_1, \dots, e'_n$  — некий набор из  $n$  векторов. Тогда каждый вектор из этого набора линейно выражается через базис.

$$e'_j = \sum_{i=1}^n c_{ij} e_i, \quad c_{ij} \in F$$
$$(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n) \cdot C, \quad C = (c_{ij})$$

То есть мы получили матрицу, где в  $j$ -ом столбце стоят коэффициенты линейного разложения вектора  $e'_j$  в базисе  $(e_1, \dots, e_n)$ .

Теперь пусть  $e'_1, \dots, e'_n$  — тоже базис в  $V$ . Вспомним, что на прошлой лекции уже было сказано, что в этом случае  $\det C \neq 0$ .

**Определение.** Матрица  $C$  называется матрицей перехода от базиса  $(e_1, \dots, e_n)$  к базису  $(e'_1, \dots, e'_n)$ .

**Замечание.** Матрица перехода от  $(e'_1, \dots, e'_n)$  к  $(e_1, \dots, e_n)$  есть  $C^{-1}$ .

И небольшое замечание касательно записи: когда базис записан в скобках, то есть  $(e_1, \dots, e_n)$ , то нам важен порядок векторов в нем, в противном случае, при записи  $e_1, \dots, e_n$ , порядок не важен.

Итого, имеем два базиса пространства  $V$ ,  $(e_1, \dots, e_n)$  и  $(e'_1, \dots, e'_n)$ , и матрицу перехода  $C$  такую, что  $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n) \cdot C$ . Возьмем некий вектор  $v$  и разложим его по обоим базисам.

$$v \in V \Rightarrow \begin{aligned} v &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n, & x_i &\in F \\ v &= x'_1 e'_1 + \dots + x'_n e'_n, & x'_i &\in F \end{aligned}$$

**Предложение.** Формула преобразования координат при переходе к другому базису:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad x_i = \sum_{j=1}^n c_{ij} x'_j$$

*Доказательство.* С одной стороны:

$$v = x'_1 e'_1 + \dots + x'_n e'_n = (e'_1 \ \dots \ e'_n) \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix} = (e_1 \ \dots \ e_n) C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}.$$

Однако с другой стороны:

$$v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n = (e_1 \ \dots \ e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Сравнивая одно с другим, получаем, что:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}.$$

□

# Линейные отображения

Пусть  $V$  и  $W$  — два векторных пространства над полем  $F$ .

**Определение.** Отображение  $f : V \rightarrow W$  называется линейным, если:

1.  $f(u_1 + u_2) = f(u_1) + f(u_2), \quad \forall u_1, u_2 \in V;$
2.  $f(\alpha u) = \alpha f(u), \quad \forall u \in V, \forall \alpha \in F.$

**Замечание.** Свойства 1–2 эквивалентны тому, что

$$f(\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2) = \alpha_1 f(u_1) + \alpha_2 f(u_2), \quad \forall u_1, u_2 \in V, \forall \alpha_1, \alpha_2 \in F.$$

Здесь важно понимать, что сначала сложение векторов и умножение на скаляр происходит в пространстве  $V$ , а потом в пространстве  $W$ .

**Простейшие свойства.**

1.  $f(\vec{0}_V) = \vec{0}_W$

*Доказательство.*  $f(\vec{0}_V) = f(0 \cdot \vec{0}_V) = 0f(\vec{0}_V) = \vec{0}_W$  □

2.  $\varphi(-u) = -\varphi(u)$ , где  $(-u)$  — обратный элемент к  $u$ .

*Доказательство.*  $\varphi(-u) + \varphi(u) = \varphi(-u + u) = \varphi(\vec{0}_V) = \vec{0}_W \Rightarrow \varphi(-u) = -\varphi(u)$  □

## Примеры

(0)  $V \rightarrow V : v \mapsto v$  — тождественное отображение.

(1)  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  линейно  $\Leftrightarrow \exists k \in \mathbb{R} : f(x) = kx, \quad \forall x \in \mathbb{R}$

*Доказательство.*

$\Rightarrow f(x) = f(x \cdot 1) = xf(1) = kx$ , где  $k = f(1)$

$\Leftarrow$  Проверим необходимые условия линейности.

1.  $f(x) = kx \Rightarrow f(x_1 + x_2) = k(x_1 + x_2) = kx_1 + kx_2 = f(x_1) + f(x_2)$
2.  $f(\alpha x) = k\alpha x = \alpha kx = \alpha f(x)$

□

(2)  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  — декартова система координат.

2.1 Поворот вокруг 0 на угол  $\alpha$  линеен.

2.2 Проекция на прямую, проходящую через 0, линейна.

(3)  $P_n = R[x]_{\leq n}$  — пространство всех многочленов от  $x$  степени не больше  $n$ .

$\Delta : f \mapsto f'$  (производная)

$$\left. \begin{aligned} (f+g)' &= f' + g' \\ (\alpha f)' &= \alpha f' \end{aligned} \right| \Rightarrow \Delta \text{ — линейное отображение из } P_n \text{ в } P_{n-1}$$

(4) Векторное пространство  $V$ ,  $\dim V = n$ ,  $e_1, \dots, e_n$  — базис.

$$V \mapsto \mathbb{R}^n$$

$$x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \mapsto \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ — тоже линейное отображение.}$$

(5)  $A \in \text{Mat}_{m \times n}$ ,  $k \geq 1$  — любое,  $\varphi : \text{Mat}_{n \times k} \rightarrow \text{Mat}_{m \times k}$ .

$$\begin{aligned} \varphi(X) &= A \cdot X \\ A(X_1 + X_2) &= AX_1 + AX_2 \\ A(\alpha X) &= \alpha(AX) \end{aligned}$$

Частный случай, при  $k = 1$  —  $\varphi : F^n \rightarrow F^m$ .

## Изоморфизм

**Определение.** Отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  называется изоморфизмом, если  $\varphi$  линейно и биективно. Обозначение:  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} W$ .

Рассмотрим те же примеры:

(0) Изоморфизм.

(1) Изоморфизм, при  $k \neq 0$ .

(2) 2.1 Изоморфизм.

2.2 Не изоморфизм.

(3) Не изоморфизм.

(4) Изоморфизм.

(5) Задача: доказать, что  $\varphi$  — изоморфизм тогда и только тогда, когда  $n = m$  и  $\det A \neq 0$ .

**Предложение.** Пусть  $\varphi : V \rightarrow W$  — изоморфизм. Тогда  $\varphi^{-1} : W \rightarrow V$  — тоже изоморфизм.

*Доказательство.* Так как  $\varphi$  — биекция, то  $\varphi^{-1}$  — тоже биекция.

$$w_1, w_2 \in W \Rightarrow \exists v_1, v_2 \in V : \begin{aligned} \varphi(v_1) &= w_1 & v_1 &= \varphi^{-1}(w_1) \\ \varphi(v_2) &= w_2 & v_2 &= \varphi^{-1}(w_2) \end{aligned}$$

Тогда осталось только доказать линейность обратного отображения. Для этого проверим выполнение необходимых условий линейности.

$$1. \varphi^{-1}(w_1 + w_2) = \varphi^{-1}(\varphi(v_1) + \varphi(v_2)) = \varphi^{-1}(\varphi(v_1 + v_2)) = \text{id}(v_1 + v_2) = v_1 + v_2$$

$$2. \alpha \in F, \quad \varphi^{-1}(\alpha w_1) = \varphi^{-1}(\alpha \varphi(v_1)) = \varphi^{-1}(\varphi(\alpha v_1)) = \text{id}(\alpha v_1) = \alpha v_1.$$

□



**Определение.** Два векторных пространства  $V$  и  $W$  называются изоморфными, если существует изоморфизм  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} W$  (и тогда существует изоморфизм  $V \xleftarrow{\sim} W$  по предположению). Обозначение:  $V \simeq W$  или  $V \cong W$ .

Отображения можно соединять в композиции:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi : U \rightarrow V \\ \psi : V \rightarrow W \end{array} \right| \Rightarrow \psi \circ \varphi : U \rightarrow W \quad \psi \circ \varphi(u) = \psi(\varphi(u))$$

**Предложение.**

1. Если  $\varphi$  и  $\psi$  линейны, то  $\psi \circ \varphi$  тоже линейно.
2. Если  $\varphi$  и  $\psi$  изоморфизмы, то  $\psi \circ \varphi$  тоже изоморфизм.

*Доказательство.*

1. Опять-таки, просто проверим необходимые условия линейности.

$$(a) \quad (\psi \circ \varphi)(u_1 + u_2) = \psi(\varphi(u_1 + u_2)) = \psi(\varphi(u_1) + \varphi(u_2)) = \psi(\varphi(u_1)) + \psi(\varphi(u_2)) = \\ = (\psi \circ \varphi)(u_1) + (\psi \circ \varphi)(u_2)$$

$$(b) \quad (\psi \circ \varphi)(\alpha u) = \psi(\varphi(\alpha u)) = \psi(\alpha \varphi(u)) = \alpha \psi(\varphi(u)) = \alpha (\psi \circ \varphi)(u)$$

2. Следует из сохранения линейности и того, что композиция биекций тоже биекция.

□

**Следствие.** Изоморфизм это отношение эквивалентности на множестве всех векторных пространств над фиксированным полем  $F$ .

*Доказательство.*

**Рефлексивность**  $V \simeq V$ .

**Симметричность**  $V \simeq W \Rightarrow W \simeq V$ .

**Транзитивность**  $(V \simeq U) \wedge (U \simeq W) \Rightarrow V \simeq W$ .

□

То есть множество всех векторных пространств над фиксированным полем  $F$  разбивается на попарно непересекающиеся классы, причем внутри одного класса любые два пространства изоморфны. Такие классы называются *классами эквивалентности*.

**Теорема.** Если два конечномерных векторных пространства  $V$  и  $W$  над полем  $F$  изоморфны, то  $\dim V = \dim W$ .

Но для начала докажем следующую лемму.

**Лемма (1).** Для векторного пространства  $V$  над полем  $F$  размерности  $n$  верно, что  $V \simeq F^n$ .

*Доказательство.* Рассмотрим отображение  $\varphi : V \rightarrow F^n$  из примера 4. Пусть  $(e_1, \dots, e_n)$  — базис пространства  $V$ . Тогда:

$$x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \mapsto \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad x_i \in F.$$

Отображение  $\varphi$  линейно и биективно, следовательно  $\varphi$  — изоморфизм. А раз существует изоморфное отображение между пространствами  $V$  и  $F^n$ , то они изоморфны. □

# Лекция 19 от 01.02.2016

## Изоморфизм (продолжение)

На прошлой лекции мы ввели теорему и доказали одну лемму. Напомним их.

**Теорема.** Если два конечномерных векторных пространства  $V$  и  $W$  изоморфны, то  $\dim V = \dim W$ .

**Лемма (1).** Если  $\dim V = n$ , то  $V \simeq F^n$ .

**Замечание.** Говорят, что функция  $\varphi$  отождествляет пространство  $V$  с пространством  $F^n$ , если  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} F^n$ .

Но перед тем, как доказывать эту теорему, докажем лучше еще одну лемму.

**Лемма (2).** Пусть  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} W$  — изоморфизм векторных пространств, а  $e_1, \dots, e_n$  — базис  $V$ . Тогда  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  — базис  $W$ .

*Доказательство.* Пусть  $w \in W$  — произвольный вектор. Положим  $v \in V$  таковым, что  $v = \varphi^{-1}(w)$ .

$$\begin{aligned} v &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n, \quad x_i \in F \\ w &= \varphi(v) = \varphi(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n) \Rightarrow W = \langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n) \rangle \end{aligned}$$

Покажем, что  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  — линейно независимые вектора.

Пусть  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$  таковы, что  $\alpha_1 \varphi(e_1) + \dots + \alpha_n \varphi(e_n) = 0$ . Это то же самое, что  $\varphi(\alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_n e_n) = 0$ . Применяя  $\varphi^{-1}$ , получаем  $\alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_n e_n = \varphi^{-1}(0) = 0$ . Но так как  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $V$ , то  $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = 0$ , и потому вектора  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  линейно независимы. Следовательно, этот набор векторов — базис в  $W$ .  $\square$

Теперь приступим наконец к доказательству теоремы.

*Доказательство.*

$\Rightarrow V \simeq W \Rightarrow \exists \varphi : V \xrightarrow{\sim} W$ . Тогда по лемме 2, если  $e_1, \dots, e_n$  — базис  $V$ , то  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  — базис  $W$ , и тогда  $\dim V = \dim W$ .

$\Leftarrow$  Пусть  $\dim V = \dim W = n$ . Тогда по лемме 1 существуют изоморфизмы  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} F^n$  и  $\psi : W \xrightarrow{\sim} F^n$ . Следовательно,  $\psi^{-1} \circ \varphi : V \rightarrow W$  — изоморфизм.  $\square$

То есть получается, что с точностью до изоморфизма существует только одно векторное пространство размерности  $n$ . Однако не стоит заканчивать на этом курс линейной алгебры. Теперь главная наша проблема — это как из бесконечного множества базисов в каждом векторном пространстве выбрать тот, который будет наиболее простым и удобным для каждой конкретной задачи.

Например, рассмотрим вектор  $v \in F^n$  с координатами  $v = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ . Пусть  $v \neq 0$ . Тогда существует такой базис  $e_1, \dots, e_n$ , что  $v = e_1$ , то есть в этом базисе вектор имеет координаты  $v = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$ .

Пусть  $V, W$  — векторные пространства над  $F$ , и  $e_1, \dots, e_n$  — базис  $V$ .

### Предложение.

1. Всякое линейное отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  однозначно определяется векторами  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$ .
2. Для всякого набора векторов  $f_1, \dots, f_n \in W$  существует единственное линейное отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  такое, что  $\varphi(e_1) = f_1, \varphi(e_2) = f_2, \dots, \varphi(e_n) = f_n$ .

*Доказательство.*

1. Пусть  $v \in V$ ,  $v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$ , где  $x_i \in F$ . Тогда  $\varphi(v) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n)$ , то есть если мы знаем вектора  $\varphi(e_i)$ , то сможем задать  $\varphi(v)$  для любого  $v \in V$ .
2. Определим отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  по формуле  $\varphi(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n) = x_1 f_1 + \dots + x_n f_n$ . Прямая проверка показывает, что  $\varphi$  линейна, а единственность следует из пункта 1.

□

**Следствие.** Если  $\dim V = \dim W = n$ , то для всякого базиса  $e_1, \dots, e_n$  пространства  $V$  и всякого базиса  $f_1, \dots, f_n$  пространства  $W$  существует единственный изоморфизм  $\varphi : V \xrightarrow{\sim} W$  такой, что  $\varphi(e_1) = f_1, \dots, \varphi(e_n) = f_n$ .

*Доказательство.* Из пункта 2. предложения следует, что существует единственное линейное отображение  $\varphi : V \rightarrow W$  такое, что  $\varphi(e_1) = f_1, \dots, \varphi(e_n) = f_n$ . Но тогда  $\varphi(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n) = x_1 f_1 + \dots + x_n f_n$  для любых  $x_i \in F$ . Отсюда следует, что  $\varphi$  — биекция. □

## Матрицы линейных отображений

Пусть  $V$  и  $W$  — векторные пространства,  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ ,  $f = (f_1, \dots, f_m)$  — базис  $W$ ,  $\varphi : V \rightarrow W$  — линейное отображение. Тогда:

$$\varphi(e_j) = a_{1j} f_1 + \dots + a_{mj} f_m = \sum_{i=1}^m a_{ij} f_i.$$

**Определение.** Матрица  $A = (a_{ij}) \in \text{Mat}_{m \times n}(F)$  называется матрицей линейного отображения  $\varphi$  в базисах  $e$  и  $f$  (или по отношению к базисам  $e$  и  $f$ ).

**Замечание.** Существует биекция  $\{\text{линейные отображения } V \rightarrow W\} \rightleftharpoons \text{Mat}_{m \times n}$ .

**Замечание.** В  $A^{(j)}$  стоят координаты  $\varphi(e_j)$  в базисе  $f$ .

$$(\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)) = (f_1, \dots, f_n) \cdot A$$

Рассмотрим пример.

Пусть  $P_n = F[x]_{\leq n}$  — множество многочленов над полем  $F$  степени не выше  $n$ . Возьмем дифференцирование  $\Delta : P_n \rightarrow P_{n-1}$ .

Базис  $P_n = 1, x, x^2, \dots, x^n$ . Базис  $P_{n-1} = 1, x, \dots, x^{n-1}$ . Тогда матрица линейного отображения будет размерности  $n \times (n+1)$  и иметь следующий вид.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & n \end{pmatrix}$$

**Предложение.** Если  $v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$  и  $\varphi(v) = y_1 f_1 + \dots + y_m f_m$ , то

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

*Доказательство.* С одной стороны:

$$\varphi(v) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n) = (\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)) \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = (f_1, \dots, f_m) A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Однако с другой стороны:

$$\varphi(v) = (f_1, \dots, f_m) \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}.$$

Сравнивая обе части, получаем требуемое. □

А теперь проанализируем операции над матрицами линейных отображений.

$V$  и  $W$  — векторные пространства. **Обозначение:**  $\text{Hom}(V, W) :=$  множество всех линейных отображений  $V \rightarrow W$ .

Пусть  $\varphi, \psi \in \text{Hom}(V, W)$ .

**Определение.**

1.  $\varphi + \psi \in \text{Hom}(V, W)$  — это  $(\varphi + \psi)(v) := \varphi(v) + \psi(v)$ .
2.  $\alpha \in F, \alpha\varphi \in \text{Hom}(V, W)$  — это  $(\alpha\varphi)(v) := \alpha(\varphi(v))$ .

**Упражнение.**

1. Проверить, что  $\varphi + \psi$  и  $\alpha\varphi$  действительно принадлежат  $\text{Hom}(V, W)$ .
2. Проверить, что  $\text{Hom}(V, W)$  является векторным пространством.

**Предложение.** Пусть  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ ,  $\mathfrak{f} = (f_1, \dots, f_m)$  — базис  $W$ ,  $\varphi, \psi \in \text{Hom}(V, W)$ . При этом  $A_\varphi$  — матрица линейного отображения  $\varphi$ ,  $A_\psi$  — матрица для  $\psi$ ,  $A_{\varphi+\psi}$  — для  $\varphi+\psi$ , а  $A_{\alpha\varphi}$  — для  $\alpha\varphi$ .

Тогда  $A_{\varphi+\psi} = A_\varphi + A_\psi$  и  $A_{\alpha\varphi} = \alpha A_\varphi$ .

*Доказательство. Упражнение.* □

Теперь возьмем три векторных пространства —  $U$ ,  $V$  и  $W$  размерности  $n$ ,  $m$  и  $k$  соответственно, и их базисы  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{g}$ . Также рассмотрим цепочку линейных отображений  $U \xrightarrow{\psi} V \xrightarrow{\varphi} W$ . Пусть  $A$  — матрица  $\varphi$  в базисах  $\mathbf{f}$  и  $\mathbf{g}$ ,  $B$  — матрица  $\psi$  в базисах  $\mathbf{e}$  и  $\mathbf{f}$ ,  $C$  — матрица  $\varphi \circ \psi$  в базисах  $\mathbf{e}$  и  $\mathbf{g}$ .

**Предложение.**  $C = AB$ .

**Замечание.** Собственно говоря, отсюда и взялось впервые определение умножения матриц.

*Доказательство.* Запишем по определению:

$$\begin{aligned} (\varphi \circ \psi)(e_r) &= \sum_{p=1}^k c_{pr} g_p, \quad r = 1, \dots, n \\ \psi(e_r) &= \sum_{q=1}^m b_{qr} f_q, \quad r = 1, \dots, n \\ \varphi(f_q) &= \sum_{p=1}^k a_{pq} g_p, \quad q = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} (\psi \circ \varphi)(e_r) &= \varphi(\psi(e_r)) = \varphi\left(\sum_{q=1}^m b_{qr} f_q\right) = \sum_{q=1}^m b_{qr} \varphi(f_q) = \sum_{q=1}^m b_{qr} \left(\sum_{p=1}^k a_{pq} g_p\right) = \sum_{p=1}^k \left(\sum_{q=1}^m a_{pq} b_{qr}\right) g_p \\ &\Downarrow \\ c_{pr} &= \sum_{q=1}^m a_{pq} b_{qr} \\ &\Downarrow \\ C &= AB \end{aligned}$$

□

И снова, пусть  $V$  и  $W$  — векторные пространства с линейным отображением  $\varphi : V \rightarrow W$ .

**Определение.** Ядро  $\varphi$  — это множество  $\text{Ker } \varphi := \{v \in V \mid \varphi(v) = 0\}$ .

**Определение.** Образ  $\varphi$  — это множество  $\text{Im } \varphi := \{w \in W \mid \exists v \in V : \varphi(v) = w\}$ .

**Пример.** Все то же  $\Delta : P_n \rightarrow P_{n-1}$ . Для него  $\text{Ker } \Delta = \{f \mid f = \text{const}\}$ ,  $\text{Im } \Delta = P_{n-1}$ .

# Лекция 20 от 08.02.2016

## Линейные отображения (продолжение)

Пусть  $\varphi: V \rightarrow W$  — линейное отображение.

**Предложение.**

1.  $\text{Ker } \varphi$  — подпространство в  $V$ .
2.  $\text{Im } \varphi$  — подпространство в  $W$ .

*Доказательство.* Проверим по определению.

1.
  - $\varphi(0_v) = 0_w$  — этот факт мы уже доказали.
  - $v_1, v_2 \in \text{Ker } \varphi \Rightarrow \varphi(v_1 + v_2) = \varphi(v_1) + \varphi(v_2) = 0_w + 0_w = 0_w \Rightarrow v_1 + v_2 \in \text{Ker } \varphi$ .
  - $v \in \text{Ker } \varphi, \alpha \in F \Rightarrow \varphi(\alpha v) = \alpha \varphi(v) = \alpha 0 = 0$ , то есть  $\alpha v$  тоже лежит в ядре.
2.
  - $0_w = \varphi(0_v) \Rightarrow 0_w \in \text{Im } (\varphi)$ .
  - $w_1, w_2 \in \text{Im } \varphi \Rightarrow \exists v_1, v_2 \in V: w_1 = \varphi(v_1), w_2 = \varphi(v_2) \Rightarrow w_1 + w_2 = \varphi(v_1) + \varphi(v_2) = \varphi(v_1 + v_2) \Rightarrow w_1 + w_2 \in \text{Im } \varphi$ .
  - $w \in \text{Im } \varphi, \alpha \in F \Rightarrow \exists v \in V: \varphi(v) = w \Rightarrow \alpha w = \alpha \varphi(v) = \varphi(\alpha v) \Rightarrow \alpha w \in \text{Im } \varphi$ .

То есть все условия подпространства по определению выполнены и предложение доказано.  $\square$

**Предложение.**

1. Отображение  $\varphi$  инъективно тогда и только тогда, когда  $\text{Ker } \varphi = \{0\}$ .
2. Отображение  $\varphi$  сюръективно тогда и только тогда, когда  $\text{Im } \varphi = W$ .

*Доказательство.*

1.
  - $[\Rightarrow]$  Очевидно.
  - $[\Leftarrow]$   $v_1, v_2 \in V: \varphi(v_1) = \varphi(v_2) \Rightarrow \varphi(v_1 - v_2) = 0 \Rightarrow v_1 - v_2 = 0 \Rightarrow v_1 = v_2$ .
2. Очевидно из определения образа.

$\square$

**Следствие.** Отображение  $\varphi$  является изоморфизмом тогда и только тогда, когда  $\text{Ker } \varphi = \{0\}$  и  $\text{Im } \varphi = W$ .

**Предложение.** Пусть  $U \subset V$  — подпространство и  $e_1, \dots, e_k$  — его базис. Тогда:

1.  $\varphi(U)$  — подпространство,  $\varphi(U) = \langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_k) \rangle$ ;
2.  $\dim \varphi(U) \leq \dim U$ .

*Доказательство.*

1.  $\varphi(x_1 e_1 + x_2 e_2 + \dots + x_k e_k) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_k \varphi(e_k) \in \langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_k) \rangle$ .

2.  $\varphi(U) = \langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_k) \rangle \Rightarrow \dim \varphi(U) \leq \dim U$  по основной лемме о линейной зависимости.

□

Пусть  $V, W$  — векторные пространства,  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ ,  $f = (f_1, \dots, f_m)$  — базис  $W$ ,  $A$  — матрица  $\varphi$  по отношению к  $e, f$ .

**Предложение.**  $\dim \operatorname{Im} \varphi = \operatorname{rk} A$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} v \in V, v &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \\ \varphi(v) &= y_1 f_1 + \dots + y_m f_m \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

$A^{(j)}$  — столбец координат в базисе  $f$ ,  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$ .

$$\alpha_1 \varphi(e_1) + \dots + \alpha_n \varphi(e_n) = 0 \Leftrightarrow \alpha_1 A^{(1)} + \dots + \alpha_n A^{(n)} = 0$$

Отсюда следует, что:

$$\operatorname{rk} A = \operatorname{rk} \{ \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n) \} = \dim \underbrace{\langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n) \rangle}_{\operatorname{Im} \varphi} = \dim \operatorname{Im} \varphi.$$

□

**Следствие.** Величина  $\operatorname{rk} A$  не зависит от выбора базисов  $e$  и  $f$ .

**Определение.** Величина  $\operatorname{rk} A$  называется рангом линейного отображения  $\varphi$ . Обозначение:  $\operatorname{rk} \varphi$ .

**Следствие.** Если  $\dim V = \dim W = n$ , то  $\varphi$  — изоморфизм тогда и только тогда, когда  $\det A \neq 0$ . Тогда  $A$  — квадратная.

*Доказательство.*

$[\Rightarrow]$   $\varphi$  — изоморфизм, следовательно:

$$\operatorname{Im} \varphi = W \Rightarrow \dim \operatorname{Im} \varphi = n \Rightarrow \operatorname{rk} A = n \Rightarrow \det A \neq 0.$$

$[\Leftarrow]$   $\det A \neq 0 \Rightarrow \exists A^{-1}$ .

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}$$

Таким образом, линейное отображение  $\varphi$  является биекцией, а значит, и изоморфизмом. □

**Следствие.** Пусть  $A \in \operatorname{Mat}_{k \times m}$ ,  $B \in \operatorname{Mat}_{m \times n}$ . Тогда  $\operatorname{rk} AB \leq \min\{\operatorname{rk} A, \operatorname{rk} B\}$ .

*Доказательство.* Реализуем  $A$  и  $B$  как матрицы линейных отображений, то есть  $\varphi_A: F^m \rightarrow F^k$ ,  $\varphi_B: F^n \rightarrow F^m$ . Тогда  $AB$  будет матрицей отображения  $\varphi_A \circ \varphi_B$ .

$$\operatorname{rk}(AB) = \operatorname{rk}(\varphi_A \circ \varphi_B) \begin{cases} \leq \dim \operatorname{Im} \varphi_A = \operatorname{rk} A \\ \leq \dim \operatorname{Im} \varphi_B = \operatorname{rk} B \end{cases}$$

Первое неравенство следует из того, что  $\operatorname{Im}(\varphi_A \circ \varphi_B) \subset \operatorname{Im} \varphi_A$ , откуда в свою очередь следует, что  $\dim \operatorname{Im}(\varphi_A \circ \varphi_B) \leq \dim \operatorname{Im} \varphi_A$ . Рассматривая второе неравенство, получаем:

$$\operatorname{Im}(\varphi_A \circ \varphi_B) = \varphi_A(\operatorname{Im} \varphi_B) \Rightarrow \dim \operatorname{Im}(\varphi_A \circ \varphi_B) = \dim(\varphi_A(\operatorname{Im} \varphi_B)) \leq \dim \operatorname{Im} \varphi_B.$$

□

**Упражнение.**

- Если  $A$  квадратна и  $\det A \neq 0$ , то  $\operatorname{rk} AB = \operatorname{rk} B$ .
- Если  $B \in M_n$  и  $\det B \neq 0$ , то  $\operatorname{rk} AB = \operatorname{rk} A$ .

**Теорема.**  $\dim \operatorname{Im} \varphi = \dim \varphi - \dim \operatorname{Ker} \varphi$ .

Существует 2 способа доказательства. Рассмотрим оба.

*Бескоординатный способ.* Пусть  $\dim \operatorname{Ker} \varphi = k$  и  $e_1, \dots, e_k$  — базис в  $\operatorname{Ker} \varphi$ . Дополним его до базиса  $V$  векторами  $e_{k+1}, \dots, e_n$ . Тогда:

$$\operatorname{Im} \varphi = \langle \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_k), \dots, \varphi(e_n) \rangle = \langle 0, 0, \dots, 0, \varphi(e_{k+1}), \dots, \varphi(e_n) \rangle = \langle \varphi(e_{k+1}), \dots, \varphi(e_n) \rangle$$

Пусть  $\alpha_{k+1}\varphi(e_{k+1}) + \dots + \alpha_n\varphi(e_n) = 0$  для некоторых  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in F$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha_{k+1}e_{k+1} + \dots + \alpha_n e_n) &= 0 \\ \alpha_{k+1}e_{k+1} + \dots + \alpha_n e_n &\in \operatorname{Ker} \varphi \\ \alpha_{k+1}e_{k+1} + \dots + \alpha_n e_n &= \beta_1 e_1 + \dots + \beta_k e_k, \end{aligned}$$

для некоторых  $\beta_1, \dots, \beta_k \in F$ .

Но так как  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $V$ , то  $\alpha_{k+1} = \dots = \alpha_n = \beta_1 = \dots = \beta_k = 0$ . То есть векторы  $\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  линейно независимы, а значит, образуют базис  $\operatorname{Im} \varphi$ . Что и означает, что  $\dim \operatorname{Im} \varphi = n - k = \dim V - \dim \operatorname{Ker} \varphi$ . □

*Координатный способ.* Зафиксируем базис  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  в  $V$  и базис  $\mathfrak{f} = (f_1, \dots, f_m)$  в  $W$ . Пусть  $A$  — матрица  $\varphi$  в базисе  $\mathfrak{f}$ . Тогда  $v = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$ ,  $\varphi(v) = y_1 f_1 + \dots + y_m f_m$ . Получим,

$$\text{что } \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

$\operatorname{Ker} \varphi$  состоит из векторов, координаты которых удовлетворяют СЛУ  $A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = 0$ . Ранее

в курсе мы уже доказали, что размерность пространства решений равна  $n - \operatorname{rk} A$ , то есть  $\dim \operatorname{Im} \varphi = n - \operatorname{rk} A = \dim V - \dim \operatorname{Ker} \varphi$ . □



# Линейные операторы

Пусть  $V$  — конечномерное векторное пространство.

**Определение.** *Линейным оператором (или линейным преобразованием) называется всякое линейное отображение  $\varphi: V \rightarrow V$ , то есть из  $V$  в себя. Обозначение:  $L(V) = \text{Hom}(V, V)$ .*

Пусть  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  — базис в  $V$  и  $\varphi \in L(V)$ . Тогда:

$$(\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)) = (e_1, \dots, e_n) A,$$

где  $A$  — матрица линейного оператора в базисе  $\mathfrak{e}$ . В столбце  $A^{(j)}$  стоят координаты  $\varphi(e_j)$  в базисе  $\mathfrak{e}$ . Матрица  $A$  — квадратная.

**Пример.**

1.  $\forall v \in V : \varphi(v) = 0$  — нулевая матрица.
2. Тождественный оператор:  $\forall v \in V : \text{id}(v) = v$  — единичная матрица.
3. Скалярный оператор  $\lambda \text{id}(v) = \lambda V$  — матрица  $\lambda E$  в любом базисе.

**Следствие** (Следствия из общих фактов о линейных отображениях).

1. Всякий линейный оператор однозначно определяется своей матрицей в любом фиксированном базисе.
2. Для всякой квадратной матрицы существует, причем единственный, линейный оператор  $\varphi$  такой, что матрица  $\varphi$  есть  $A$ .
3. Пусть  $\varphi \in L(V)$ ,  $A$  — матрица  $\varphi$  в базисе  $\mathfrak{e}$ . Тогда:

$$\begin{aligned} v &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \\ \varphi(v) &= y_1 e_1 + \dots + y_n e_n \\ \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} &= A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Пусть  $\varphi \in L(V)$ ,  $A$  — матрица  $\varphi$  в базисе  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$ . Пусть  $\mathfrak{e}' = (e'_1, \dots, e'_n)$  — другой базис, причём  $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$ , где  $C$  — матрица перехода, и  $A'$  — матрица  $\varphi$  в базисе  $\mathfrak{e}'$ .

**Предложение.**  $A' = C^{-1}AC$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} (e'_1, \dots, e'_n) &= (e_1, \dots, e_n)C \\ e'_j &= \sum_{i=1}^n c_{ij} e_i \\ \varphi(e'_j) &= \varphi\left(\sum_{i=1}^n c_{ij} e_i\right) = \sum_{i=1}^n c_{ij} \varphi(e_i) \\ (\varphi(e'_1), \dots, \varphi(e'_n)) &= (\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n))C = (e_1, \dots, e_n)AC = (e'_1, \dots, e'_n) \underbrace{C^{-1}AC}_{A'} \end{aligned}$$

□

# Лекция 21 от 15.02.2016

## Инвариантность и обратимость

Пусть  $\varphi: V \rightarrow V$  — линейный оператор, и  $e$  — базис в  $V$ .

**Обозначение.**  $A(\varphi, e)$  — матрица линейного оператора  $\varphi$  в базисе  $e$ .

Если  $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$  — ещё один базис, причём  $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$ , где  $C$  — матрица перехода,  $A = A(\varphi, e)$  и  $A' = A(\varphi, e')$ . В прошлый раз мы доказали, что  $A' = C^{-1}AC$ .

**Следствие.** Величина  $\det A$  не зависит от выбора базиса. Обозначение:  $\det \varphi$ .

*Доказательство.* Пусть  $A'$  — матрица  $\varphi$  в другом базисе. Тогда получается, что:

$$\det A' = \det (C^{-1}AC) = \det C^{-1} \det A \det C = \det A \det C \frac{1}{\det C} = \det A.$$

□

Заметим, что  $\det A$  — инвариант самого  $\varphi$ .

**Определение.** Две матрицы  $A', A \in M_n(F)$  называются подобными, если существует такая матрица  $C \in M_n(F)$ ,  $\det C \neq 0$ , что  $A' = C^{-1}AC$ .

**Замечание.** Отношение подобия на  $M_n$  является отношением эквивалентности.

**Предложение.** Пусть  $\varphi \in L(V)$ . Тогда эти условия эквивалентны:

1.  $\text{Ker } \varphi = \{0\}$ ;
2.  $\text{Im } \varphi = V$ ;
3.  $\varphi$  обратим (то есть это биекция, изоморфизм);
4.  $\det \varphi \neq 0$ .

*Доказательство.*

1.  $\Leftrightarrow$  2 — следует из формулы  $\dim V = \dim \text{Ker } \varphi + \dim \text{Im } \varphi$ .
2.  $\Leftrightarrow$  3 — уже было.
3.  $\Leftrightarrow$  4 — уже было.

□

**Определение.** Линейный оператор  $\varphi$  называется вырожденным, если  $\det \varphi = 0$ , и невырожденным, если  $\det \varphi \neq 0$ .

**Определение.** Подпространство  $U \subset V$  называется инвариантным относительно  $\varphi$  (или  $\varphi$ -инвариантным), если  $\varphi(U) \subset U$ . То есть  $\forall u \in U: \varphi(u) \in U$ .

**Пример.**

1.  $\{0\}, V$  — они инвариантны для любого  $\varphi$ .

2.  $\text{Ker } \varphi$   $\varphi$ -инвариантно,  $\varphi(\text{Ker } \varphi) = \{0\} \subset \text{Ker } \varphi$

3.  $\text{Im } \varphi$  тоже  $\varphi$ -инвариантно,  $\varphi(\text{Im } \varphi) \subset \varphi(V) = \text{Im } \varphi$ .

Пусть  $U \subset V$  —  $\varphi$ -инвариантное подпространство. Также пусть  $(e_1, \dots, e_k)$  — базис в  $U$ . Дополним его до базиса  $V$ :  $e = (e_1, \dots, e_n)$ .

$$\underbrace{A(\varphi, e)}_{\text{Матрица с углом нулей}} = \begin{pmatrix} B & C \\ 0 & D \end{pmatrix}, \quad \text{где } B \in M_k$$

Это нетрудно понять, если учесть, что  $\varphi(e_i) \in \langle e_1, \dots, e_k \rangle$ ,  $i = 1, \dots, k$ . Если  $U = \text{Ker } \varphi$ , то  $B = 0$ . Если  $U = \text{Im } \varphi$ , то  $D = 0$ .

Обратно, если матрица  $A$  имеет в базисе  $e$  такой вид, то  $U = \langle e_1, \dots, e_k \rangle$  — инвариантное подпространство.

**Обобщение.** Пусть  $V = U \oplus W$ , где  $U, W$  — инвариантные подпространства, и  $(e_1, \dots, e_k)$  — базис  $U$ . Тогда  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ .

$$A(\varphi, e) = \begin{pmatrix} * & 0 \\ 0 & * \end{pmatrix}$$

**Обобщение.**

$$A(\varphi, e) = \begin{pmatrix} * & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & * & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & * & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & * \end{pmatrix} \begin{matrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_s \end{matrix}$$

Здесь  $k_1, \dots, k_s$  — размеры квадратных блоков блочно-диагональной матрицы. Матрица  $A(\varphi, e)$  имеет такой вид тогда и только тогда, когда:

$$\begin{aligned} U_1 &= \langle e_1, \dots, e_{k_1} \rangle \\ U_2 &= \langle e_{k_1+1}, \dots, e_{k_1+k_2} \rangle \\ &\vdots \\ U_{k_s} &= \langle e_{n-k_s+1}, \dots, e_n \rangle \end{aligned}$$

**Предел мечтаний.** Найти такой базис, в котором матрица линейного оператора была бы диагональной. Но такое возможно не всегда.

## Собственные векторы и собственные значения

Пусть  $\varphi \in L(V)$ .

**Определение.** Ненулевой вектор  $v \in V$  называется собственным для  $V$ , если  $\varphi(v) = \lambda v$  для некоторого  $\lambda \in F$ . При этом число  $\lambda$  называется собственным значением линейного оператора  $\varphi$ , отвечающим собственному вектору  $v$ .

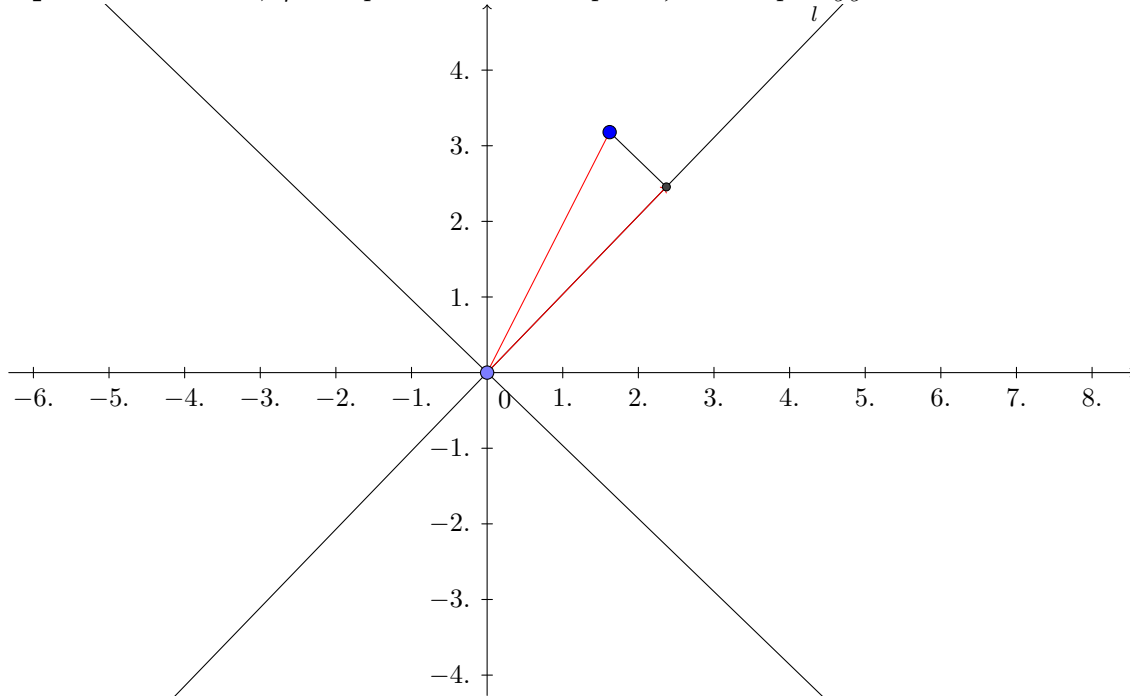
**Предложение.** Вектор  $v \in V$ ,  $v \neq 0$  — собственный вектор в  $V$  тогда и только тогда, когда линейная оболочка  $\langle v \rangle$  является  $\varphi$ -инвариантным подпространством

*Доказательство.*

- $[\Rightarrow] \varphi(v) = \lambda v \Rightarrow \langle v \rangle = \{kv \mid k \in F\}$ . Тогда  $\varphi(kv) = \lambda kv \in \langle v \rangle$ .
- $[\Leftarrow] \varphi(V) \in \langle v \rangle \Rightarrow \exists \lambda \in F: \varphi(v) = \lambda v$ .

□

**Пример.** 1.  $V = \mathbb{R}^2$ ,  $\varphi$  — ортогональная проекция на прямую  $l$ .



$$0 \neq v \in l \Rightarrow \varphi(v) = 1 \cdot v, \lambda = 1$$

$$0 \neq v \perp l \Rightarrow \varphi(v) = 0 = 0 \cdot v, \lambda = 0$$

2. Поворот на угол  $\varphi$  вокруг нуля на угол  $\alpha$ .

- $\alpha = 0 + 2\pi k$ . Любой ненулевой вектор собственный.  $\lambda = 1$ .
- $\alpha = \pi + 2\pi k$ . Любой ненулевой вектор собственный.  $\lambda = -1$ .
- $\alpha \neq \pi k$ . Собственных векторов нет.

3.  $V = P_n(F)$  — многочлены степени  $n$ ,  $\varphi = \Delta: f \rightarrow f'$ . Тогда  $0 \neq f$  — собственный вектор тогда, и только тогда, когда  $f = \text{const}$ .

## Диагонализуемость

**Определение.** Линейный оператор  $\varphi$  называется диагонализуемым, если существует базис  $e$  в  $V$  такой, что  $A(\varphi, e)$  диагональна.

**Предложение** (Критерий диагонализуемости). Отображение  $\varphi$  диагонализуемо тогда и только тогда, когда в  $V$  существует базис из собственных векторов.

*Доказательство.* Пусть  $e$  — базис  $V$ . Тогда  $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ , что равносильно  $\varphi(e_i) = \lambda_i e_i$ . Это и означает, что все векторы собственные. □

В примерах выше:

1.  $\varphi$  диагонализуем.  $e_1 \in l$ ,  $e_2 \perp l$ . Тогда матрица примет вид  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ .

2. Если  $\alpha = \pi k$ , то  $\varphi$  диагонализуем ( $\varphi = \text{id}$  или  $\varphi = -\text{id}$ ). Не диагонализуем в других случаях.
3.  $\varphi$  диагонализуем тогда и только тогда, когда  $n = 0$ . При  $n > 0$  собственных векторов МАЛО.

## Собственное подпространство

Пусть  $\varphi \in L(V)$ ,  $\lambda \in F$ .

**Определение.** Множество  $V_\lambda(\varphi) = \{v \in V \mid \varphi(v) = \lambda v\}$  называется собственным подпространством линейного оператора, отвечающим собственному значению  $\lambda$ .

**Упражнение.** Доказать, что  $V_\lambda(\varphi)$  — действительно подпространство.

**Предложение.**  $V_\lambda(\varphi) = \text{Ker}(\varphi - \lambda \text{id})$ .

*Доказательство.*

$$v \in V_\lambda(\varphi) \Leftrightarrow \varphi(v) = \lambda v \Leftrightarrow \varphi(v) - \lambda v = 0 \Leftrightarrow (\varphi - \lambda \text{id})(v) = 0 \Leftrightarrow v \in \text{Ker}(\varphi - \lambda \text{id})$$

□

**Следствие.** Собственное подпространство  $V_\lambda(\varphi) \neq \{0\}$  тогда и только тогда, когда  $\det(\varphi - \lambda \text{id}) = 0$ .

**Определение.** Многочлен  $\chi_\varphi(t) = (-1)^n \det(\varphi - t \text{id})$  называется характеристическим.

# Лекция 22 от 22.02.2016

## Деление многочленов с остатком

Пусть  $F$  — поле,  $\mathbb{F}[x]$  — множество всех многочленов от переменной  $x$  с коэффициентами из  $\mathbb{F}$ .

**Теорема.** Пусть  $G(x), H(x) \in \mathbb{F}[x]$  — ненулевые многочлены, тогда существует единственная пара  $Q(x), R(x) \in \mathbb{F}(x)$  такая, что:

1.  $G(x) = Q(x) \cdot H(x) + R(x)$ ;
2.  $\deg R(x) < \deg H(x)$  или  $R(x) = 0$ .

*Доказательство.* Аналогично делению рациональных чисел с остатком. □

Рассмотрим важный частный случай:  $H(x) = x - a$ .

**Теорема (Безу).** Если  $G(x), Q(x) \in \mathbb{F}[x]$  — ненулевые многочлены,  $a \in \mathbb{F}$ , то  $R = G(a)$  и  $G(x) = Q(x)(x - a) + R$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} G(x) &= Q(x) \cdot H(x) + R(x) \\ H(x) &= (x - a) \Rightarrow \deg R < \deg(x - a) \Rightarrow \deg R = 0 \end{aligned}$$

Подставим  $x = a$ :

$$G(a) = Q(a)(a - a) + R = 0 + R = R \Rightarrow G(a) = R.$$

□

**Теорема.** Многочлен степени  $n$  в поле комплексных чисел имеет  $n$  комплексных корней.

*Доказательство.* По основной теореме алгебры каждый многочлен  $G(x) \in \mathbb{C}[x]$  степени больше 1 имеет корень. Тогда  $G(x) = (x - a_1)G_1(x)$ , где  $a_1$  — корень многочлена  $G(x)$ . В свою очередь, многочлен  $G_1(x)$  также имеет корень, и тогда  $G(x) = (x - a_1)G_1(x) = (x - a_1)(x - a_2)G_2(x)$ . Продолжая по индукции, получаем, что  $G(x) = (x - a_1)(x - a_2) \dots (x - a_n)b_n$ , где  $b_n$  — коэффициент при старшем члене. □

Также мы получаем следующее представление:

$$b_n x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_0 = b_n (x - a_1)^{k_1} \dots (x - a_s)^{k_s}$$

**Определение.** Кратностью корня  $a_i$  называется число  $k_i$  такое, что в многочлене  $b_n(x - a_1)^{k_1} \dots (x - a_s)^{k_s}$  множитель  $(x - a_i)$  имеет степень  $k_i$ .

# Собственные значения и характеристический многочлен

**Определение.** Пусть  $V$  — конечномерное векторное пространство над полем  $\mathbb{F}$ . Рассмотрим линейный оператор  $\varphi : V \rightarrow V$ . Тогда характеристический многочлен  $\varphi$  имеет вид:

$$\begin{aligned}\chi_\varphi(t) &= (-1)^n \det(\varphi - tE) = (-1)^n \begin{vmatrix} a_{11} - t & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - t & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - t \end{vmatrix} = \\ &= (-1)^n (t^n(-1)^n + \dots) = t^n + c_{n-1}t^{n-1} + \dots + c_0\end{aligned}$$

**Упражнение.** Доказать, что:

$$\begin{aligned}c_{n-1} &= -\operatorname{tr} \varphi; \\ c_0 &= (-1)^n \det \varphi.\end{aligned}$$

**Утверждение.**  $\lambda$  — собственное значение линейного оператора  $\varphi$  тогда и только тогда, когда  $\chi_\varphi(\lambda) = 0$ .

*Доказательство.*  $\lambda$  — собственное значение  $\Leftrightarrow \exists v \neq 0 : \varphi(v) = \lambda v \Leftrightarrow (\varphi - \lambda E)v = 0 \Leftrightarrow \operatorname{Ker}(\varphi - \lambda E) \neq \{0\} \Leftrightarrow \det(\varphi - \lambda E) = 0 \Leftrightarrow \chi_\varphi(\lambda) = 0$ .  $\square$

**Утверждение.** Если  $\mathbb{F} = \mathbb{C}$  и  $\dim V > 0$ , то любой линейный оператор имеет собственный вектор.

*Доказательство.* Пусть  $\varphi : V \rightarrow V$  — линейный оператор. У него существует характеристический многочлен  $\chi_\varphi(x)$ . Тогда по основной теореме алгебры у  $\chi_\varphi(x)$  есть корень  $t_0$  — собственное значение  $\varphi$ , следовательно существует и собственный вектор  $v_0$  с собственным значением  $t_0$ .  $\square$

**Пример.** Для линейного оператора  $\varphi = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  (поворот на  $90^\circ$  градусов против часовой стрелки относительно начала координат) характеристический многочлен имеет вид  $\chi_\varphi(x) = t^2 + 1$ .

При  $\mathbb{F} = \mathbb{R} \Rightarrow$  собственных значений нет.

При  $\mathbb{F} = \mathbb{C} \Rightarrow$  собственные значения  $\pm i$ .

## Геометрическая и алгебраическая кратности

**Определение.** Пусть  $\lambda$  — собственное значение  $\varphi$ , тогда  $V_\lambda = \{v \in V \mid \varphi(v) = \lambda v\}$  — собственное подпространство, то есть пространство, состоящее из собственных векторов с собственным значением  $\lambda$  и нуля.

**Определение.**  $\dim V_\lambda$  — геометрическая кратность собственного значения  $\lambda$ .

**Определение.** Если  $k$  — кратность корня характеристического многочлена, то  $k$  — алгебраическая кратность собственного значения.

**Утверждение.** Геометрическая кратность не больше алгебраической кратности.

*Доказательство.* Зафиксируем базис  $u_1, \dots, u_p$  в пространстве  $V_\lambda$ , где  $p = \dim V_\lambda$ . Дополним базис  $u_1, \dots, u_p$  до базиса  $u_1, \dots, u_p, u_{p+1}, \dots, u_n$  пространства  $V$ . Матрица линейного оператора  $\varphi$  будет выглядеть следующим образом:

$$A_\varphi = \left( \begin{array}{c|c} \lambda E & A \\ \hline 0 & B \end{array} \right), \quad \lambda E \in M_p, A \in M_{n-p}$$

Тогда характеристический многочлен будет следующим:

$$\chi_\varphi(t) = (-1)^n \det(A_\varphi - t) = \left( \begin{array}{ccc|c} \lambda - t & & 0 & \\ & \ddots & & A \\ 0 & & \lambda - t & \\ \hline & 0 & & b - tE \end{array} \right) = (-1)^n (\lambda - t)^p \dim(B - tE)$$

Как видим,  $\chi_\varphi(t)$  имеет корень кратности хотя бы  $p$ , следовательно, геометрическая кратность, которая равна  $p$  по условию, точно не превосходит алгебраическую.  $\square$

**Пример.** Рассмотрим линейный оператор  $\varphi = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ .

$V_2 = \langle e_1 \rangle \Rightarrow$  геометрическая кратность равна 1.

$\chi_\varphi(t) = (t - 2)^2 \Rightarrow$  алгебраическая кратность равна 2.

## Сумма и прямая сумма нескольких подпространств

**Определение.** Пусть  $U_1, \dots, U_k \subseteq V$  — векторные пространства. Суммой нескольких пространств называется  $U_1 + \dots + U_k = \{u_1 + \dots + u_k \mid u_i \in U_i\}$ .

**Упражнение.**  $U_1 + \dots + U_k$  — подпространство.

**Определение.** Сумма пространств называется прямой, если  $u_1 + \dots + u_k = 0$  тогда и только тогда, когда  $u_1 = \dots = u_k = 0$ . Обозначение:  $U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ .

**Упражнение.** Если  $v \in U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ , то существует единственный такой набор  $u_1 \in U_1, \dots, u_k \in U_k$ , что  $v = u_1 + \dots + u_k$ .

**Теорема.** Следующие условия эквивалентны:

1. Сумма  $U_1 + \dots + U_k$  — прямая;
2. Если  $e_i$  — базис  $U_i$ , то  $e = e_1 \cup \dots \cup e_k$  — базис  $U_1 + \dots + U_k$ ;
3.  $\dim(U_1 + \dots + U_k) = \dim U_1 + \dots + \dim U_k$ .

*Доказательство.*

(1)  $\Rightarrow$  (2) Пусть мы имеем прямую сумму  $U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ . Покажем, что  $e_1 \cup \dots \cup e_k$  — базис  $U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ .

Возьмем вектор  $v \in U_1 \oplus \dots \oplus U_k$  и представим его в виде суммы  $v = u_1 + \dots + u_k$ , где  $u_i \in U_i$ . Такое разложение единственное, так как сумма прямая. Теперь представим каждый вектор этой суммы в виде линейной комбинации базиса соответствующего пространства:

$$v = (c_1^1 e_1^1 + \dots + c_{s_1}^1 e_{s_1}^1) + \dots + (c_1^k e_1^k + \dots + c_{s_k}^k e_{s_k}^k)$$

Здесь  $e_j^i$  это  $j$ -ый базисный вектор в  $e_i$ , базисе  $U_i$ . Соответственно,  $c_j^i$  это коэффициент перед данным вектором.

Если  $e \neq e_1 \cup \dots \cup e_k$ , то существует какая-то еще линейная комбинация вектора  $v$  через эти же векторы:

$$v = (d_1^1 e_1^1 + \dots + d_{s_1}^1 e_{s_1}^1) + \dots + (d_1^k e_1^k + \dots + d_{s_k}^k e_{s_k}^k)$$



Вычтем одно из другого:

$$0 = v - v = ((d_1^1 - c_1^1)e_1^1 + \dots + (d_{s_1}^1 - c_{s_1}^1)e_{s_1}^1) + \dots + ((d_1^k - c_1^k)e_1^k + \dots + (d_{s_k}^k - c_{s_k}^k)e_{s_k}^k)$$

Но по определению прямой суммы, ноль представим только как сумма нулей, то есть  $d_j^i$  должно равняться  $c_j^i$ . А это значит, что не существует никакой другой линейной комбинации вектора  $v$ . Что нам и требовалось.

(2)  $\Rightarrow$  (1) Пусть  $e = e_1 \cup \dots \cup e_k$  — базис  $U_1 + \dots + U_k$ . Тогда представим 0 в виде суммы векторов из данных пространств:  $0 = u_1 + \dots + u_k$ , где  $u_i \in U_i$ . Аналогично прошлому пункту, разложим векторы по базисам:

$$0 = (c_1^1 e_1^1 + \dots + c_{s_1}^1 e_{s_1}^1) + \dots + (c_1^k e_1^k + \dots + c_{s_k}^k e_{s_k}^k)$$

Но только тривиальная комбинация базисных векторов дает ноль. Следовательно,  $u_1 = \dots = u_k = 0$ , и наша сумма по определению прямая.

(2)  $\Rightarrow$  (3) Пусть  $e = e_1 \cup \dots \cup e_k$  — базис  $U_1 + \dots + U_k$ . Тогда:

$$\dim(U_1 + \dots + U_k) = \dim(e) = \dim(e_1) + \dots + \dim(e_k) = \dim(U_1) + \dots + \dim(U_k).$$

(3)  $\Rightarrow$  (2) Пусть  $\dim(U_1 + \dots + U_k) = \dim U_1 + \dots + \dim U_k$ .

Векторы  $e$  порождают сумму, следовательно, из  $e$  можно выделить базис суммы:

$$\dim(U_1 + \dots + U_k) \leq \dim(e) \leq \dim(e_1) + \dots + \dim(e_k) = \dim U_1 + \dots + \dim U_k.$$

Но по условию  $\dim(U_1 + \dots + U_k) = \dim U_1 + \dots + \dim U_k$ . Тогда  $\dim(U_1 + \dots + U_k) = \dim(e)$ , и  $e$  это базис  $U_1 + \dots + U_k$ .

□

# Лекция 23 от 29.02.2016

## Сумма собственных подпространств

Вспомним, чем закончилась прошлая лекция.

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $U_1, \dots, U_k \subseteq V$  — векторные подпространства.

Сумма  $U = U_1 + \dots + U_k$  является прямой, если из условия  $u_1 + \dots + u_k = 0$  следует, что  $u_1 = \dots = u_k = 0$ , где  $u_i \in U_i$ . Обозначение:  $U = U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ .

Эквивалентные условия:

1.  $U = U_1 \oplus \dots \oplus U_k$ .
2. Если  $e_i$  — базис  $U_i$ , то  $e = e_1 \cup \dots \cup e_k$  — базис  $U$ .
3.  $\dim U = \dim U_1 + \dots + \dim U_k$ .

Пусть  $V$  — векторное пространство над полем  $F$ ,  $\varphi \in L(V)$ ,  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  — набор собственных значений  $\varphi$ , где  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$ , и  $V_{\lambda_i}(\varphi) \subseteq V$  — соответствующее собственное подпространство.

**Предложение.** Сумма  $V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V_{\lambda_k}(\varphi)$  является прямой.

*Доказательство.* Докажем индукцией по  $k$ .

База:  $k = 1$ . Тут все ясно.

Теперь пусть утверждение доказано для всех значений, меньших  $k$ . Докажем для  $k$ .

Пусть  $v_i \in V_{\lambda_i}(\varphi)$  и пусть  $v_1 + \dots + v_k = 0$ . Тогда:

$$\begin{aligned}\varphi(v_1 + \dots + v_k) &= \varphi(0) = 0 \\ \varphi(v_1) + \dots + \varphi(v_k) &= 0 \\ \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k &= 0\end{aligned}$$

Теперь вычтем из нижней строчки  $v_1 + \dots + v_k = 0$ , домноженное на  $\lambda_k$ . Получим:

$$\begin{aligned}(\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + \dots + (\lambda_k - \lambda_k)v_k &= 0 \\ (\lambda_1 - \lambda_k)v_1 + \dots + (\lambda_{k-1} - \lambda_k)v_{k-1} + 0v_k &= 0\end{aligned}$$

Но из предположения индукции, а также потому что  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$ , следует, что  $v_1 = \dots = v_{k-1} = 0$ . Но тогда и  $v_k = 0$ .

Следовательно, сумма прямая, что нам и требовалось. □

## Диагонализируемость

**Следствие.** Если характеристический многочлен имеет ровно  $n$  попарно различных корней, где  $n = \dim V$ , то  $\varphi$  диагонализуем.

*Доказательство.* Пусть  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  — корни  $\chi_\varphi(t)$ ,  $\lambda_i \neq \lambda_j$ . Тогда для всех  $i$  выполняется, что  $V_{\lambda_i}(\varphi) \neq \{0\}$  и, следовательно,  $\dim V_{\lambda_i}(\varphi) = 1$ . Но так как сумма  $V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V_{\lambda_k}(\varphi)$  — прямая, то  $\dim(V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V_{\lambda_k}(\varphi)) = \dim V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + \dim V_{\lambda_k}(\varphi) = n$ . Иными словами,  $V = V_{\lambda_1}(\varphi) \oplus \dots \oplus V_{\lambda_k}(\varphi)$ .

Выберем произвольные  $v_i \in V_{\lambda_i} \setminus \{0\}$ . Тогда  $(v_1, \dots, v_n)$  будет базисом в  $V$ . И так как все  $v_i$  — собственные значения для  $\varphi$ , то  $\varphi$  диагонализировать.  $\square$

**Теорема** (Критерий диагонализированности - 2). *Линейный оператор  $\varphi$  диагонализировать тогда и только тогда, когда*

1.  $\chi_\varphi(t)$  разлагается на линейные множители;
2. Если  $\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_s)^{k_s}$ , где  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$ , то  $\dim V_{\lambda_i}(\varphi) = k_i \forall i$  (то есть для любого собственного значения  $V$  равны геометрическая и алгебраическая кратности).

*Доказательство.*

$\Rightarrow$  Так как  $\varphi$  — диагонализировать, то существует базис  $e = (e_1, \dots, e_n)$  такой, что:

$$A(\varphi, e) = \begin{pmatrix} \mu_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \mu_n \end{pmatrix} = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n).$$

Тогда:

$$\chi_\varphi(t) = (-1)^n \begin{vmatrix} \mu_1 - t & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \mu_n - t \end{vmatrix} = (-1)^n (\mu_1 - t) \dots (\mu_n - t) = (t - \mu_1) \dots (t - \mu_n).$$

Итого, первое условие выполняется.

Теперь перепишем характеристический многочлен в виде  $\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_s)^{k_s}$ , где  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$  и  $\{\lambda_1, \dots, \lambda_s\} = \{\mu_1, \dots, \mu_n\}$ . Тогда  $V_{\lambda_i} \supseteq \langle e_j \mid \mu_j = \lambda_i \rangle$ , следовательно,  $\dim V_{\lambda_i}(\varphi) \geq k_i$ . Но мы знаем, что  $\dim V_{\lambda_i} \leq k_i$ ! Значит,  $\dim V_{\lambda_i} = k_i$ .

$\Leftarrow$  Так как  $V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V_{\lambda_s}(\varphi)$  — прямая, то  $\dim(V_{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V_{\lambda_s}(\varphi)) = k_1 + \dots + k_s = n$ .

Пусть  $e_i$  — базис в  $V_{\lambda_i}$ . Тогда  $e_1 \cup \dots \cup e_s$  — базис в  $V$ . То есть мы нашли базис из собственных векторов, следовательно,  $\varphi$  диагонализировать.  $\square$

## Инвариантные подпространства в $\mathbb{R}^n$

Пусть  $V$  — векторное пространство над полем  $\mathbb{C}$ ,  $\varphi \in L(V)$ . Тогда в  $V$  есть собственный вектор (или одномерное  $\varphi$ -инвариантное пространство).

Теперь пусть  $V$  — векторное пространство над полем  $\mathbb{R}$ ,  $\varphi \in L(V)$ .

**Теорема.** *Существует одномерное или двумерное  $\varphi$ -инвариантное векторное подпространство.*

*Доказательство.* Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис в  $V$ . Комплексифицируем  $V$ .

$$V^{\mathbb{C}} = \{u + iv \mid u, v \in V\}$$

$$V^{\mathbb{C}} \supset V = \{u + i \cdot 0 \mid u \in V\}$$

Рассмотрим линейный оператор  $\varphi_{\mathbb{C}} \in L(V^{\mathbb{C}})$ , заданный как  $\varphi_{\mathbb{C}}(e_i) = \varphi(e_i)$ ,  $\forall i$ . Значит,  $e_1, \dots, e_n$  — базис в  $V^{\mathbb{C}}$ . Следовательно,  $\chi_{\varphi_{\mathbb{C}}}(t) = \chi_{\varphi}(t)$ , так как  $A(\varphi_{\mathbb{C}}, e) = A(\varphi, e)$ .

Случай 1:  $\chi_{\varphi}(t)$  имеет хотя бы один действительный корень. Отсюда следует, что в  $V$  есть собственный вектор, что равносильно существованию одномерного  $\varphi$ -инвариантного подпространства (тогда  $V^{\mathbb{C}}$  нам не нужен).

Случай 2:  $\chi_{\varphi}$  не имеет действительных корней. Пусть  $\lambda + i\mu$  — некоторый корень  $\chi_{\varphi}(t)$ , который, напомним, равен  $\chi_{\varphi_{\mathbb{C}}}(t)$ . Тогда существует собственный вектор  $u + iv \in V^{\mathbb{C}}$  такой, что:

$$\begin{aligned}\varphi_{\mathbb{C}}(u + iv) &= (\lambda + i\mu)(u + iv) \\ \varphi_{\mathbb{C}}(u + iv) &= \varphi_{\mathbb{C}}(u) + i\varphi_{\mathbb{C}}(v) = \varphi(u) + i\varphi(v) \\ (\lambda + i\mu)(u + iv) &= \lambda u - \mu v + i(\mu u + \lambda v)\end{aligned}$$

Сравнивая два последних равенства, получаем:

$$\begin{aligned}\varphi(u) &= \lambda u - \mu v \\ \varphi(v) &= \mu u + \lambda v\end{aligned}$$

Следовательно,  $\langle u, v \rangle$  —  $\varphi$ -инвариантное подпространство, двумерное если  $u$  и  $v$  линейно независимы и одномерное в противном случае.  $\square$

**Пример.** Поворот на  $\alpha$  в  $\mathbb{R}^2$ :  $\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ . Тогда  $u = e_1$ ,  $v = e_2$ ,  $\lambda + i\mu = \cos \alpha + i \sin \alpha$ .

Пусть  $V$  — векторное пространство над  $F$ ,  $\dim V = n$ .

Операции над  $L(V)$ :

1. Сложение:  $(\varphi + \psi)(v) = \varphi(v) + \psi(v)$ .
2. Умножение на скаляр:  $(\alpha\varphi)(v) = \alpha\varphi(v)$ .
3. Умножение:  $(\varphi\psi)(v) = \varphi(\psi(v))$ .

В частности, для любого  $P(x) \in \mathbb{F}[x]$ ,  $P(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$  и для любого  $\varphi \in L(V)$  определен линейный оператор  $P(\varphi) \in L(V)$ :  $P(\varphi) = a_n \varphi^n + \dots + a_1 \varphi + a_0 \text{id}$ .

## Корневые векторы и корневые подпространства

**Определение.** Вектор  $v \in V$  называется *корневым вектором* линейного оператора  $\varphi$ , отвечающим значению  $\lambda \in F$ , если существует  $m \geq 0$  такое, что  $(\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0$ .

Наименьшее такое  $m$  называют *высотой* корневого вектора  $v$ .

**Замечание.**

1. Вектор  $v = 0$  для любого  $\varphi$  имеет высоту 0.

2. Высоту 1 имеют все собственные векторы.

**Пример.**  $V = \mathbb{F}[x]_{\leq n}$ ,  $\Delta : f \rightarrow f'$ . Здесь  $\lambda = 0$  — единственное собственное значение. Все векторы — корневые, отвечающие  $\lambda = 0$ .

**Определение.** Множество  $V^\lambda(\varphi) = \{v \in V \mid \exists m \geq 0 : (\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0\}$  называется корневым пространством для  $\lambda \in F$ .

**Упражнение.**  $V^\lambda(\varphi)$  — подпространство в  $V$ .

**Замечание.**  $V_\lambda(\varphi) \subseteq V^\lambda(\varphi) \forall \lambda \in F$ .

# Лекция 24 от 14.03.2016

## Корневые подпространства

Вспомним конец прошлой лекции.

Пусть  $V$  — векторное пространство над полем  $\mathbb{F}$ ,  $\varphi \in L(V)$  — линейный оператор.

Вектор  $v \in V$  — корневой для  $\varphi$ , отвечающий собственному значению  $\lambda \in \mathbb{F}$  тогда и только тогда, когда существует  $m \geq 0$  такое, что  $(\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0$ . Высотой корневого вектора называется наименьшее такое  $m$ .

Корневым подпространством называется пространство из корневых векторов, соответствующих одному значению  $\lambda$  и нулевого вектора. Другими словами,  $V^\lambda(\varphi) = \{v \in V \mid \exists m \geq 0 : (\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0\}$ . Поскольку собственный вектор является корневым вектором высоты 1, то собственное подпространство включено в корневое подпространство с тем же значением:  $V_\lambda(\varphi) \subseteq V^\lambda(\varphi)$ .

**Предложение.** Корневое подпространство нетривиально тогда и только тогда, когда  $\lambda$  является собственным значением. Другими словами,  $V^\lambda \neq \{0\} \Leftrightarrow \chi_\varphi(\lambda) = 0$ .

*Доказательство.*

$$\Leftarrow \chi_\varphi(\lambda) = 0 \Rightarrow V_\lambda(\varphi) \neq \{0\} \Rightarrow V^\lambda(\varphi) \neq \{0\}, \text{ так как } V^\lambda(\varphi) \supset V_\lambda(\varphi).$$

$$\Rightarrow \text{Пусть } V^\lambda(\varphi) \neq \{0\} \Rightarrow \exists v \neq 0 \in V^\lambda(\varphi) \Rightarrow \exists m \geq 1 : (\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0.$$

Рассмотрим  $u = (\varphi - \lambda \text{id})^{m-1}(v) \neq 0$ , тогда:

$$(\varphi - \lambda \text{id})(u) = (\varphi - \lambda \text{id})(\varphi - \lambda \text{id})^{m-1}(v) = (\varphi - \lambda \text{id})^m(v) = 0.$$

То есть вектор  $u$  — это вектор, для которого  $(\varphi - \lambda \text{id})(u) = 0$ , то есть собственный вектор. Следовательно  $\lambda$  — собственное значение.

□

**Предложение.** Для любого собственного значения  $\lambda \in \mathbb{F}$  подпространство  $V^\lambda(\varphi)$  инвариантно относительно  $\varphi$ .

*Доказательство.* Пусть  $v$  — корневой вектор высоты  $m$ . Докажем, что  $\varphi(v)$  — также корневой вектор.

Заметим, что если  $u = (\varphi - \lambda \text{id})(v)$ , то  $u$  — корневой вектор высоты  $m - 1$ , и, соответственно, лежит в корневом пространстве:

$$u = (\varphi - \lambda \text{id})(v) = \varphi(v) - \lambda v \in V^\lambda(\varphi).$$

Мы получили, что  $\varphi(v) \in \lambda v + V^\lambda(\varphi)$ . Но  $\lambda v \in V^\lambda(\varphi)$ , то есть  $\lambda v + V^\lambda(\varphi) = V^\lambda(\varphi)$  и  $\varphi(v) \in V^\lambda(\varphi)$ . Что и означает, что пространство инвариантно относительно оператора  $\varphi$ . □

Положим для краткости, что  $\varphi - \lambda \text{id} = \varphi_\lambda$ .

Заметим, что ядра степеней линейного оператора «вкладываются» друг в друга — те векторы, которые стали нулевыми при применении линейного оператора  $\varphi_\lambda^k$ , при применении линейного оператора  $\varphi_\lambda$  ещё раз так и остаются нулевыми, а также «добиваются» (переводятся в нулевые) некоторые ранее ненулевые векторы. Итого, получаем следующее:

$$V_\lambda(\varphi) = \ker \varphi_\lambda \subset \ker \varphi_\lambda^2 \subset \dots \subset \ker \varphi_\lambda^m \subset \dots$$

Причём существует такое  $m$ , что  $\ker \varphi_\lambda^m = \ker \varphi_\lambda^{m+1}$ , так как  $V$  — конечномерно и размерность его не может уменьшаться бесконечно. Выберем наименьшее такое  $m$ .

**Упражнение.** Доказать, что для любого  $s \geq 0$  выполняется равенство  $\ker \varphi_\lambda^m = \ker \varphi_\lambda^{m+s}$ .

Заметим также, что  $V^\lambda(\varphi) = \ker \varphi_\lambda^m$ . Пусть  $k_i = \dim \ker \varphi_\lambda^i$ . Тогда:

$$\dim V_\lambda(\varphi) = k_1 < k_2 < \dots < k_m = \dim V^\lambda(\varphi).$$

Будем обозначать как  $\varphi|_V$  ограничение линейного оператора на пространство  $V$ .

**Предложение.**

1. Характеристический многочлен линейного отображения  $\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}$  равен  $(t - \lambda)^{k_m}$ .
2. Если  $\mu \neq \lambda$ , то линейный оператор  $\varphi - \mu \text{id}$  невырожден на  $V^\lambda(\varphi)$ .

*Доказательство.* Напомним, что  $k_i = \dim \ker \varphi_\lambda^i$ , для  $i = 1, \dots, m$ . Пусть также  $k_0 = 0$ .

Выберем базис  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_{k_m})$  в  $V^\lambda(\varphi)$  так, чтобы  $(e_1, \dots, e_{k_i})$  также был базисом в  $\ker \varphi_\lambda^i$ . Тогда:

$$A(\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}, \mathfrak{e}) = \begin{pmatrix} 0 & * & * & \dots & * & * \\ 0 & 0 & * & \dots & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \dots & * & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & * \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{где } a_{ij} \in \text{Mat}_{(k_i - k_{i-1}) \times (k_j - k_{j-1})}$$

Но тогда:

$$A(\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}, \mathfrak{e}) = A(\varphi_\lambda|_{V^\lambda(\varphi)}, \mathfrak{e}) + \lambda E = \begin{pmatrix} A_1 & * & * & \dots & * & * \\ 0 & A_2 & * & \dots & * & * \\ 0 & 0 & A_3 & \dots & * & * \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_{m-1} & * \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_m \end{pmatrix}, \quad \text{где } A_i = \lambda E_{k_i - k_{i-1}} \quad (*)$$

А значит, характеристический многочлен линейного отображения  $\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}$  равен  $(t - \lambda)^{k_m}$ .

Теперь докажем невырожденность линейного оператора  $(\varphi - \mu \text{id})$  при  $\mu \neq \lambda$ .

Рассмотрим матрицу ограничения этого оператора на корневое подпространство:

$$A((\varphi - \mu \text{id})|_{V^\lambda(\varphi)}, \mathfrak{e}) = A(\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}, \mathfrak{e}) - \mu E.$$

Она имеет вид  $(*)$ , где  $A_i = (\lambda - \mu)E_{k_i}$ . Следовательно,

$$\det((\varphi - \mu \text{id})|_{V^\lambda(\varphi)}) = (\lambda - \mu)^{k_m} \neq 0.$$

Что и означает, что линейный оператор невырожден. □

**Предложение.** Если  $\lambda$  – собственное значение  $\varphi$ , то  $\dim V^\lambda(\varphi)$  равен кратности  $\lambda$  как корня многочлена  $\chi_\varphi(t)$ .

*Доказательство.* Пусть  $(e_1, \dots, e_k)$  — базис  $V^\lambda(\varphi)$ ,  $k = \dim V^\lambda(\varphi)$ . Дополним  $(e_1, \dots, e_k)$  до базиса  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  всего пространства  $V$ . Тогда матрица линейного оператора имеет следующий вид:

$$A_\varphi = \left( \begin{array}{c|c} B & * \\ \hline 0 & C \end{array} \right), \quad B \in M_k, C \in M_{n-k}$$

$$\chi_\varphi(t) = \det(tE - A) = \det(tE - B) \det(tE - C).$$

Заметим, что  $\det(tE - B)$  — это характеристический многочлен  $\varphi|_{V^\lambda(\varphi)}$ , следовательно,

$$\chi_\varphi(t) = (t - \lambda)^k \det(tE - C).$$

Осталось показать, что  $\lambda$  — не корень  $\det(tE - C)$ .

Пусть  $W = \langle e_{k+1}, \dots, e_n \rangle$ . Тогда рассмотрим линейный оператор  $\psi \in L(W)$ , у которого матрица в базисе  $(e_{k+1}, \dots, e_n)$  есть  $C$ . Предположим, что  $\det(\lambda E - C) = 0$ . Это значит, что  $\lambda$  — собственное значение для  $\psi$  и существует вектор  $w \in W$ ,  $w \neq 0$  такой, что  $\psi(w) = \lambda w$ .

Тогда:

$$\begin{aligned} \varphi(w) &= \lambda w + u, \quad u \in V^\lambda(\varphi) \\ \varphi(w) - \lambda w &\in V^\lambda(\varphi) \\ (\varphi - \text{id})(w) &\in V^\lambda(\varphi) \Rightarrow w \in V^\lambda(\varphi) \end{aligned}$$

Получили противоречие. Значит,  $\lambda$  — не корень  $\det(tE - C)$ . □

**Следствие.**  $V^\lambda(\varphi) = \ker \varphi_\lambda^s$ , где  $s$  — кратность  $\lambda$  как корня многочлена  $\varphi_\lambda(t)$ .

**Предложение.** Если  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ , где  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$  — собственные значения  $\varphi$ , то сумма  $V^{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V^{\lambda_k}(\varphi)$  — прямая.

*Доказательство.* Докажем индукцией по  $k$ .

База при  $k = 1$  — ясно.

Теперь пусть утверждение доказано для всех значений, меньших  $k$ . Докажем для  $k$ .

Выберем векторы  $v_i \in V^{\lambda_i}(\varphi)$  такие, что  $v_1 + \dots + v_k = 0$ . Пусть  $m$  — высота вектора  $v_k$ . Тогда применим к нашей сумме оператор  $\varphi_{\lambda_k}^m$ , получив следующее:

$$\varphi_{\lambda_k}^m(v_1) + \dots + \varphi_{\lambda_k}^m(v_{k-1}) + \varphi_{\lambda_k}^m(v_k) = 0.$$

С другой стороны,  $\varphi_{\lambda_k}^m(v_k) = 0$ , то есть:

$$\varphi_{\lambda_k}^m(v_1) + \dots + \varphi_{\lambda_k}^m(v_{k-1}) + \varphi_{\lambda_k}^m(v_k) = \varphi_{\lambda_k}^m(v_1) + \dots + \varphi_{\lambda_k}^m(v_{k-1}) = 0.$$

Тогда по предположению индукции  $\varphi_{\lambda_k}^m(v_1) = \dots = \varphi_{\lambda_k}^m(v_{k-1}) = 0$ . Но  $\varphi_\lambda|_{V^\lambda(\varphi)}$  не вырожден и обратим при  $i \neq k$ , следовательно  $v_1 = \dots = v_{k-1} = 0$ . Но тогда и  $v_k = 0$ .

Следовательно, сумма прямая, что нам и требовалось. □

**Теорема.** Если характеристический многочлен  $\chi_\varphi(t)$  разлагается на линейные множители, причём  $\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_s)^{k_s}$ , то  $V = \bigoplus_{i=1}^s V^{\lambda_i}(\varphi)$ .

*Доказательство.* Так как сумма  $V^{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V^{\lambda_i}(\varphi)$  прямая и для любого  $i$  выполняется, что  $\dim(V^{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V^{\lambda_i}(\varphi)) = k_i$ , то:

$$\dim(V^{\lambda_1}(\varphi) + \dots + V^{\lambda_s}(\varphi)) = k_1 + \dots + k_s = \dim V.$$

Следовательно,  $V = \bigoplus_{i=1}^s V^{\lambda_i}(\varphi)$ . □



## Жордановы клетки

**Определение.** Пусть  $\lambda \in \mathbb{F}$ . **Жордановой клеткой** порядка  $n$ , отвечающей значению  $\lambda$ , называется матрица вида:

$$J_{\lambda}^n = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda \end{pmatrix} \in M_n(\mathbb{F}).$$

# Лекция 25 от 21.03.2016

## Жорданова нормальная форма

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $\varphi$  — линейный оператор.

**Теорема** (Жорданова нормальная форма линейного оператора). Пусть  $\chi_\varphi(t)$  разлагается на линейные множители. Тогда существует базис  $e$  в  $V$  такой, что

$$A(\varphi, e) = \begin{pmatrix} J_{\mu_1}^{n_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_{\mu_2}^{n_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & J_{\mu_p}^{n_p} \end{pmatrix} \quad (*)$$

Кроме того, матрица  $(*)$  определена однозначно с точностью до перестановок жордановых клеток.

**Определение.** Матрица  $(*)$  называется жордановой нормальной формой линейного оператора.

**Следствие.** В векторном пространстве над полем комплексных чисел для любого линейного оператора существует жорданова нормальная форма.

**Схема построения:**

Шаг 1: Разложим характеристический многочлен:  $\chi_\varphi(t) = (t - \lambda_1)^{k_1} \dots (t - \lambda_s)^{k_s}$ , где  $\lambda_i \neq \lambda_j$  при  $i \neq j$ . Тогда, по доказанной на прошлой лекции теореме,  $V = \bigoplus_{i=1}^s V^{\lambda_i}(\varphi)$ , причем  $\dim V^{\lambda_i}(\varphi) = k_i$ .

Введем отображение  $\psi_i = \varphi|_{V^{\lambda_i}(\varphi)} \in L(V^{\lambda_i}(\varphi))$ . Тогда  $\chi_{\psi_i}(t) = (t - \lambda_i)^{k_i}$ . Также введем  $e_i$  — базис  $V^{\lambda_i}(\varphi)$ . Пусть  $e = e_1 \cup \dots \cup e_s$ .

Тогда:

$$A(\varphi, e) = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_s \end{pmatrix}, \quad \text{где } A_i = A(\psi_i, e_i) \in M_{k_i}.$$

Шаг 2: Для любого  $i$  можно выбрать базис  $e_i$  так, чтобы

$$A_i = \begin{pmatrix} J_{\lambda_i}^{m_{i1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_{\lambda_i}^{m_{i2}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & J_{\lambda_i}^{m_{iq}} \end{pmatrix}, \quad m_{i1} + \dots + m_{iq} = k_i$$

Обратите внимание, что здесь все жордановы клетки отвечают одному значению  $\lambda_i$ , но при этом матрица  $A_i$  целиком жорданову клетку не образует, так как линия единиц над

диагональю из  $\lambda$  разрывна там, где состыковываются две клетки:

$$\left( \begin{array}{cccc|cccc} \lambda_i & 1 & & & & & & \\ & \ddots & \ddots & & & & & \\ & & \lambda_i & 1 & & & & \\ & & & \lambda_i & 0 & & & \\ \hline & & & & \lambda_i & 1 & & \\ & & & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & & & \lambda_i & 1 \\ & & & & & & & \lambda_i \end{array} \right)$$

Тогда жорданова нормальная форма матрицы  $A(\varphi, \mathfrak{e})$  составляется из таких матриц  $A_i$ :

$$A(\varphi, \mathfrak{e}) = \begin{pmatrix} J_{\lambda_1}^{m_{11}} & & & & & \\ & J_{\lambda_1}^{m_{12}} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & J_{\lambda_2}^{m_{21}} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & J_{\lambda_s}^{m_{s1}} \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & J_{\lambda_s}^{m_{sk_i}} \end{pmatrix}$$

Шаг 3: Осталось только заметить, что для каждого  $\lambda_i$  число и порядок жордановых клеток однозначно определено из последовательности чисел:

$$\begin{aligned} & \dim \ker(\psi_1 - \lambda_1 \text{id}) \\ & \dim \ker(\psi_2 - \lambda_2 \text{id})^2 \\ & \dots \\ & \dim \ker(\psi_i - \lambda_i \text{id})^i \end{aligned}$$

Откуда и следует однозначность представления в виде жордановой нормальной формы (с точностью до перестановки жордановых клеток).

## Линейные функции на векторном пространстве

Рассмотрим функцию  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ .

Пусть  $x_0 \in \mathbb{R}^n$  и  $y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$  — приращение, то есть  $x = x_0 + y$ . Из этого следует, что

$$f(x) = f(x_0) + a_1 y_1 + \dots + a_n y_n + b_{11} y_1^2 + \dots + b_{ij} y_i y_j + \dots + b_{nn} y_n^2 + \bar{o}(|y|^2).$$

Тогда сумма  $a_1 y_1 + \dots + a_n y_n$  будет называться линейной формой, а сумма  $b_{11} y_1^2 + \dots + b_{ij} y_i y_j + \dots + b_{nn} y_n^2$  — квадратичной формой.

Теперь дадим строгое определение:

**Определение.** *Линейной функцией (формой) на векторном пространстве  $V$  называется всякое линейное отображение  $\sigma: V \rightarrow F$ , где  $F$  — одномерное векторное пространство.*

*Обозначение:*  $V^* = \text{Hom}(V, F)$ .

**Замечание.** Формой принято называть, когда векторное пространство состоит из функций.

**Пример.**

1.  $\alpha: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}; \varphi(v) = \langle v, e \rangle$  — скалярное произведение с некоторым фиксированным  $e$ .
2.  $\alpha: \mathcal{F}(X, F) \rightarrow F; \alpha(f) = f(x_0)$ . Здесь  $\mathcal{F}(X, F) = \{f: X \rightarrow F\}$ .
3.  $\alpha: C[a, b] \rightarrow \mathbb{R}; \alpha(f) = \int_a^b f(x)dx$ .
4.  $\alpha: \text{Mat}(F) \rightarrow F; \alpha(X) = \text{tr} A$ .

**Определение.** Пространство  $V^*$  называется сопряженным (двойственным) к  $V$ .

Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ , и существует изоморфизм  $\alpha: V \xrightarrow{\sim} M_n$ . Тогда

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n), \text{ где } \alpha_i = \alpha(e_i). \text{ При этом, если } x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n, \text{ то } \alpha(x) = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

**Следствие.**  $\dim V^* = n$ .

Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ . Рассмотрим линейные формы  $\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_n$  такие, что  $\varepsilon_i(e_j) = \delta_{ij}$ , где  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$  — символ Кронекера. То есть  $\varepsilon_i = (\delta_{i1}, \dots, \delta_{ii}, \dots, \delta_{in}) = (0, \dots, 1, \dots, 0)$ .

**Предложение.**  $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  — базис в  $V^*$ .

*Доказательство.* Возьмем любое  $\alpha \in V^*$ . Положим  $a_i = \alpha(e_i)$ . Тогда  $\alpha = a_1 \varepsilon_1 + \dots + a_n \varepsilon_n$ . То есть мы получили, что через  $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  действительно можно выразить любое  $\alpha$ .

Теперь покажем, что  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  — линейно независимы. Пусть  $a_1 \varepsilon_1 + \dots + a_n \varepsilon_n = 0$ ,  $a_i \in F$ . Применив эту функцию к  $e_i$ , получим, что  $a_1 \varepsilon_1(e_i) + \dots + a_n \varepsilon_n(e_i) = 0$ . Отсюда следует, что  $a_i = 0$ , а все остальные  $a_j$ , при  $j \neq i$ , равны нулю в силу определения  $\varepsilon_j$ . Итого,  $a_1 = \dots = a_n = 0$ , что и доказывает линейную независимость.  $\square$

**Определение.** Базис  $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  называется сопряженным базисом.

**Упражнение.** Всякий базис  $V^*$  сопряжен с некоторым базисом  $V$ .

## Билинейные функции на векторном пространстве

**Определение.** Билинейной функцией (формой) на векторном пространстве  $V$  называется всякое билинейное отображение  $\beta: V \times V \rightarrow F$ . То есть это отображение, линейное по каждому аргументу:

1.  $\beta(x_1 + x_2, y) = \beta(x_1, y) + \beta(x_2, y);$
2.  $\beta(\lambda x, y) = \lambda \beta(x, y);$
3.  $\beta(x, y_1 + y_2) = \beta(x, y_1) + \beta(x, y_2);$
4.  $\beta(x, \lambda y) = \lambda \beta(x, y).$

**Пример.**

1.  $V = \mathbb{R}^n$ ,  $\beta(x, y) = \langle x, y \rangle$  — скалярное произведение.

2.  $V = \mathbb{R}^2$ ,  $\beta(x, y) = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}$ .

3.  $V = C[a, b]$ ,  $\beta(f, g) = \int_a^b f(x)g(x)dx$ .

# Лекция 26 от 06.04.2016

## Матрицы билинейных функций

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $\dim V < \infty$ ,  $\beta: V \times V \rightarrow F$  — билинейная функция.

**Определение.** Матрицей билинейной функции в базисе  $e$  называется матрица  $B = (b_{ij})$ , где  $b_{ij} = \beta(e_i, e_j)$ . Обозначение:  $B(\beta, e)$ .

Пусть  $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \in V$  и  $y = y_1 e_1 + \dots + y_n e_n \in V$ . Тогда:

$$\begin{aligned}\beta(x, y) &= \beta\left(\sum_{i=1}^n x_i e_i, \sum_{j=1}^n y_j e_j\right) = \sum_{i=1}^n x_i \beta\left(e_i, \sum_{j=1}^n y_j e_j\right) = \\ &= \sum_{i=1}^n x_i \sum_{j=1}^n y_j \beta(e_i, e_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i b_{ij} y_j = \\ &= (x_1, \dots, x_n) B \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (*)\end{aligned}$$

**Предложение.**

1. Всякая билинейная функция однозначно определяется своей матрицей в базисе  $e$  (и, следовательно, в любом другом базисе).
2. Для любой матрицы  $B \in M_n(F)$  существует единственная билинейная функция  $\beta$  такая, что  $B = B(\beta, e)$ .

*Доказательство.*

1. Уже доказано, это следует из формулы (\*).
2. Определим  $\beta$  по формуле (\*). Тогда  $\beta$  — это билинейная функция на  $V$  и ее матрица есть в точности  $B$ . Единственность следует из все той же формулы.

□

**Замечание.** Эта биекция не имеет никакого отношения к биекции линейных операторов с квадратными матрицами.

Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  и  $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$  — два базиса  $V$ ,  $\beta$  — билинейная функция на  $V$ . Пусть также  $e' = eC$ , где  $C$  — матрица перехода, также  $B(\beta, e) = B$  и  $B(\beta, e') = B'$ .

**Предложение.**  $B' = C^T B C$ .

*Доказательство.* Рассмотрим представление вектора  $x \in V$  в обоих базисах.

$$\begin{aligned}x &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n = (e_1, \dots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \\ x &= x'_1 e'_1 + \dots + x'_n e'_n = (e'_1, \dots, e'_n) \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}\end{aligned} \implies \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x'_1 \\ \vdots \\ x'_n \end{pmatrix}$$

Аналогично для  $y \in V$ :

$$\begin{aligned} y &= (e_1, \dots, e_n) \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \\ y &= (e'_1, \dots, e'_n) \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix} \end{aligned} \Rightarrow \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix}.$$

Тогда, если мы транспонируем формулу для  $x$ , получаем:

$$\beta(x, y) = (x_1, \dots, x_n) B \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = (x'_1, \dots, x'_n) C^T B C \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix}.$$

Одновременно с этим:

$$\beta(x, y) = (x'_1, \dots, x'_n) B' \begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_n \end{pmatrix}.$$

Сравнивая эти две формулы, получаем, что  $B' = C^T B C$ . □

**Следствие.** Число  $\text{rk } B$  не зависит от выбора базиса.

**Определение.** Число  $\text{rk } B$  называется рангом билинейной функции  $\beta$ . Обозначение:  $\text{rk } \beta$ .

## Симметричные билинейные функции

Как и для линейных операторов, неплохо было бы научиться находить такой базис, в котором матрица  $B$  была бы проще. Но мы это сделаем только для некоторого класса билинейных функций.

**Определение.** Билинейная функция называется симметричной, если  $\beta(x, y) = \beta(y, x)$  для любых  $x, y \in V$ .

**Предложение.** Билинейная функция  $\beta$  симметрична тогда и только тогда, когда матрица  $B(\beta, e)$  — симметрическая (т.е. она равна своей транспонированной).

*Доказательство.* Пусть  $B = B(\beta, e)$ .

$$\Rightarrow \beta(e_i, e_j) = b_{ij} = b_{ji} = \beta(e_j, e_i) \Rightarrow B \text{ симметрична.}$$

$\Leftarrow$  Пусть  $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$  и  $y = y_1 e_1 + \dots + y_n e_n$ . Также воспользуемся тем, что данная нам матрица симметрична, то есть равна своей транспонированной.

$$\begin{aligned} \beta(y, x) &= (y_1, \dots, y_n) B \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \left[ (y_1, \dots, y_n) B \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \right]^T = \\ &= (x_1, \dots, x_n) B^T \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = (x_1, \dots, x_n) B \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \beta(x, y) \end{aligned}$$

То есть  $\beta(y, x) = \beta(x, y)$ , что и означает, что  $\beta$  симметрична. □

# Квадратичные функции

**Определение.** Пусть  $\beta: V \times V \rightarrow F$  — билинейная функция. Тогда  $Q_\beta: V \rightarrow F$ , заданная формулой  $Q_\beta(x) = \beta(x, x)$ , называется квадратичной функцией (формой), ассоциированной с билинейной функцией  $\beta$ .

Покажем, что такая квадратичная функция на самом деле является однородным многочленом степени 2 от  $n$  переменных. Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ ,  $B = B(\beta, e)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . Тогда:

$$Q_\beta(x) = (x_1, \dots, x_n)V \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j$$

Квадратичную функцию удобно так представлять, но не определять.

**Пример.** Здесь  $e$  — стандартный базис.

$$1. V = \mathbb{R}^n, \beta(x, y) = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n \Rightarrow Q_\beta(x) = x_1^2 + \dots + x_n^2, B(\beta, e) = E.$$

$$2. V = \mathbb{R}^2, \beta(x, y) = 2x_1 y_2 \Rightarrow Q_\beta(x) = 2x_1 x_2, B(\beta, e) = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$3. V = \mathbb{R}^2, \beta(x, y) = x_1 y_2 + x_2 y_1 \Rightarrow Q_\beta(x) = 2x_1 x_2, B(\beta, e) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

**Замечание.** Квадратичная функция задает билинейную функцию не однозначно (примеры 2 и 3).

В дальнейшем нам понадобится делить на два. Поэтому далее предположим, что в нашем поле  $F$  можно делить на два. Что это означает? Заметим, что  $2 = 1 + 1$ , и, строго говоря, нельзя делить на ноль. Следовательно, наше условие можно переформулировать: рассматриваем такие поля  $F$ , в которых  $1 + 1 \neq 0$ . В терминах поля, это уже гораздо более осмысленное и понятное условие.

**Теорема.** Отображение  $\beta \mapsto Q_\beta$  является биекцией между симметричными билинейными функциями на  $V$  и квадратичными функциями на  $V$ .

*Доказательство.*

Суръективность. Пусть  $\beta$  — билинейная функция. Рассмотрим тогда ассоциированную с ней квадратичную функцию  $Q_\beta(x) = \beta(x, x)$ . Пусть  $\sigma(x, y) = \frac{1}{2}(\beta(x, y) + \beta(y, x))$  — симметричная билинейная функция на  $V$ . Тогда:

$$Q_\sigma(x) = \sigma(x, x) = \frac{1}{2}(\beta(x, x) + \beta(x, x)) = \beta(x, x) = Q_\beta(x)$$

Итого,  $Q_\sigma = Q_\beta$ . Следовательно, отображение суръективно.

Инъективность. Пусть  $\beta(x, y)$  — симметричная билинейная функция. Аналогично, рассмотрим  $Q_\beta(x) = \beta(x, x)$ . Посмотрим на  $Q_\beta(x + y)$ :

$$Q_\beta(x + y) = \beta(x + y, x + y) = \beta(x, x) + \beta(x, y) + \beta(y, x) + \beta(y, y) = Q_\beta(x) + Q_\beta(y) + 2\beta(x, y)$$

$\Downarrow$

$$\beta(x, y) = \frac{1}{2} (Q_\beta(x + y) - Q_\beta(x) - Q_\beta(y))$$

Полученная выше формула как раз и означает, что значения билинейной функции однозначно задаются соответствующей квадратичной функцией.  $\square$



**Замечание.**

1. Билинейная функция  $\sigma(x, y) = \frac{1}{2}(\beta(x, y) + \beta(y, x))$  называется симметризацией билинейной функции  $\beta$ . Причем если  $B = B(\beta, \mathfrak{e})$  и  $S = B(\sigma, \mathfrak{e})$ , то  $S = \frac{1}{2}(B + B^T)$ .
2. Симметричная билинейная функция  $\beta(x, y) = \frac{1}{2}(Q_\beta(x + y) - Q_\beta(x) - Q_\beta(y))$  называется поляризацией квадратичной функции  $Q$ .

**Пример.** Для предыдущих двух примеров:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left( \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^T \right)$$

Далее вся терминология для билинейных функций переносится на квадратичные функции.

Теперь вспоминаем, что перед нами стоит задача научиться приводить к хорошему виду.

**Определение.** Квадратичная функция  $Q$  имеет в базисе  $\mathfrak{e}$  канонический вид, если для любого вектора  $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$  верно, что  $Q_\beta(x) = a_1 x_1^2 + \dots + a_n x_n^2$ , где  $a_i \in F$ . Иными словами,  $B(\beta, \mathfrak{e}) = \text{diag}(a_1, \dots, a_n)$ .

**Определение.** Квадратичная функция  $Q$  имеет нормальный вид в базисе  $\mathfrak{e}$ , если для любого вектора  $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$  верно, что  $Q_\beta(x) = a_1 x_1^2 + \dots + a_n x_n^2$ , причем  $a_i \in \{-1, 0, 1\}$ .

# Лекция 27 от 13.04.2016

## Привидение к каноническому и нормальному виду

Пусть  $V$  — векторное пространство,  $\dim V = n$ ,  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $V$ ,  $Q: V \rightarrow F$  — квадратичная функция на  $V$ .

**Теорема.** Для любой квадратичной функции  $Q$  существует такой базис, в котором  $Q$  имеет канонический вид.

*Доказательство.* Метод Лагранжа.

Докажем индукцией по  $n$ .

При  $n = 1$  имеем, что  $Q(x) = ax^2$ , то есть уже имеем канонический вид.

Предположим, что для всех значений меньших  $n$  доказано. Докажем тогда для  $n$ .

Пусть  $A = (a_{ij})$  — матрица квадратичной функции  $Q$  в исходном базисе. Тогда:

$$Q(x) = Q(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_{ii}x_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij}x_i x_j$$

Случай 0: пусть  $a_{ij} = 0$  для всех пар  $(i, j)$ . Тогда  $Q(x) = 0x_1^2 + \dots + 0x_n^2$  — уже канонический вид.

Случай 1: пусть существует такое  $i$ , что  $a_{ii} \neq 0$ . Перенумеровав переменные, считаем, что  $a_{11} \neq 0$ . Тогда:

$$\begin{aligned} Q(x_1, \dots, x_n) &= (a_{11}x_1^2 + 2a_{12}x_1x_2 + \dots + 2a_{1n}x_1x_n) + Q_1(x_2, \dots, x_n) = \\ &= \frac{1}{a_{11}} \left( (a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n)^2 - (a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n)^2 \right) + Q_1(x_2, \dots, x_n) = \\ &= \frac{1}{a_{11}} (a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n)^2 + Q_2(x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

Теперь сделаем следующую замену переменных:

$$\begin{aligned} x'_1 &= a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \\ x'_2 &= x_2, \dots, x'_n = x_n \end{aligned}$$

Получаем:

$$Q(x'_1, \dots, x'_n) = \frac{1}{a_{11}}x_1'^2 + Q_2(x'_2, \dots, x'_n)$$

Дальше пользуемся предположением индукции для  $Q_2$ , окончательно получая канонический вид для исходной  $Q$ .

Случай 2: пусть  $a_{ii} = 0$  для всех  $i$ , но существует такая пара  $(i, j)$ , где  $i < j$ , что  $a_{ij} \neq 0$ . Переименовываем переменные так, чтобы  $a_{12} \neq 0$  и делаем замену:

$$\begin{aligned} x_1 &= x'_1 - x'_2 \\ x_2 &= x'_1 + x'_2 \\ x_3 &= x'_3, \dots, x_n = x'_n \end{aligned}$$

Тогда  $2a_{12}x_1x_2 = 2a_{12}x_1'^2 - 2a_{12}x_2'^2$ . Следовательно:

$$Q(x'_1, \dots, x'_n) = 2a_{12}x_1'^2 - 2a_{12}x_2'^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij}x_i'x_j'$$

Таким образом, мы пришли к случаю 1, который уже умеем решать. □

**Следствие.** Всякую квадратичную функцию над полем  $\mathbb{R}$  можно заменой базиса привести к нормальному виду.

*Доказательство.* Существует такой базис, в котором  $Q(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1^2 + \dots + a_nx_n^2$ . Сделаем замену:

$$x'_i = \begin{cases} \sqrt{|a_i|}x_i, & \text{если } a_i \neq 0 \\ x_i, & \text{если } a_i = 0 \end{cases}$$

Второе условие нужно для того, чтобы можно было выразить старые переменные через новые, не деля при этом на ноль.

Получаем, что  $Q(x'_1, \dots, x'_n) = \varepsilon_1x_1'^2 + \dots + \varepsilon_nx_n'^2$ , где  $\varepsilon_i = \operatorname{sgn} a_i \in \{-1, 0, 1\}$ . Что нам и было надо.  $\square$

**Замечание.** Если  $F = \mathbb{C}$ , то любую квадратичную функцию  $Q$  можно привести к виду  $Q(x_1, \dots, x_n) = x_1^2 + \dots + x_k^2$ , где  $k \leq n$  ( $k = \operatorname{rk} Q$ ), то есть  $B(Q, e) = \operatorname{diag}(1, \dots, 1, 0, \dots, 0)$ .

## Закон инерции, индексы инерции

Пусть  $Q$  — квадратичная функция над  $\mathbb{R}$ , которая в базисе  $e$  имеет нормальный вид:

$$Q(x_1, \dots, x_n) = x_1^2 + \dots + x_s^2 - x_{s+1}^2 - \dots - x_{s+t}^2,$$

где  $s$  — это количество положительных слагаемых, а  $t$  — отрицательных.

**Теорема (Закон инерции).** Числа  $s, t$  не зависят от выбора базиса, в котором  $Q$  имеет нормальный вид.

*Доказательство.* Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис такой, что  $v = x_1e_1 + \dots + x_ne_n$  и  $Q$  имеет в нем нормальный вид:  $Q(v) = x_1^2 + \dots + x_s^2 - x_{s+1}^2 - \dots - x_{s+t}^2$ .

Пусть также  $f = (f_1, \dots, f_n)$  — другой базис такой, что  $v = y_1e_1 + \dots + y_ne_n$  и  $Q$  также имеет в нем нормальный вид:  $Q(v) = y_1^2 + \dots + y_p^2 - y_{p+1}^2 - \dots - y_{p+q}^2$ .

Заметим, что  $s + t = p + q$ , так как обе эти суммы равны  $\operatorname{rk} Q$ . В допущении, что  $s \neq p$ , не умоляя общности будем считать, что  $s > p$ .

Положим  $L_1 = \langle e_1, \dots, e_s \rangle$ ,  $\dim L_1 = s$  и  $L_2 = \langle f_{p+1}, \dots, f_n \rangle$ ,  $\dim L_2 = n - p$ . Видно, что  $L_1 + L_2 \subset V$ , а значит,  $\dim(L_1 + L_2) \leq n$ . Тогда:

$$\dim(L_1 \cap L_2) = \dim L_1 + \dim L_2 - \dim(L_1 + L_2) \geq s + n - p - n = s - p > 0.$$

Следовательно, существует ненулевой вектор  $v \in L_1 \cap L_2$ . Разложим тогда этот вектор в базисах данных линейных оболочек:

$$\begin{aligned} v &= x_1e_1 + \dots + x_se_s, \exists x_i \neq 0 \Rightarrow Q(v) = x_1^2 + \dots + x_s^2 > 0 \\ v &= y_{p+1}f_{p+1} + \dots + y_nf_n \Rightarrow Q(v) = -y_{p+1}^2 - \dots - y_{p+q}^2 \leq 0 \end{aligned}$$

Получили противоречие. Значит, исходное предположение неверно и  $s = p$ . Откуда в свою очередь следует, что  $t = q$ .  $\square$

**Определение.** Эти числа имеют свои названия:

1.  $i_+ := s$  — положительный индекс инерции;
2.  $i_- := t$  — отрицательный индекс инерции;

3.  $i_0 := n - s - t$  — нулевой индекс инерции.

**Определение.** Квадратичная функция  $Q$  над полем  $\mathbb{R}$  называется

Термин	Обозначение	Условие
положительно определенной	$Q > 0$	$Q(x) > 0 \ \forall x \neq 0$
отрицательно определенной	$Q < 0$	$Q(x) < 0 \ \forall x \neq 0$
неотрицательно определенной	$Q \geq 0$	$Q(x) \geq 0 \ \forall x$
неположительно определенной	$Q \leq 0$	$Q(x) \leq 0 \ \forall x$
неопределенной	—	$\exists x, y: Q(x) > 0, Q(y) < 0$

Термин	Нормальный вид	Индексы инерции
положительно определенной	$x_1^2 + \dots + x_n^2$	$i_+ = n, i_- = 0$
отрицательно определенной	$-x_1^2 - \dots - x_n^2$	$i_+ = 0, i_- = n$
неотрицательно определенной	$x_1^2 + \dots + x_k^2, k \leq n$	$i_+ = k, i_- = 0$
неположительно определенной	$-x_1^2 - \dots - x_k^2, k \leq n$	$i_+ = 0, i_- = k$
неопределенной	$x_1^2 + \dots + x_s^2 - x_{s+1}^2 - \dots - x_{s+t}^2, s, t \geq 1$	$i_+ = s, i_- = t$

**Пример.**  $V = \mathbb{R}^2$ .

1.  $Q(x, y) = x^2 + y^2, Q > 0$ ;
2.  $Q(x, y) = -x^2 - y^2, Q < 0$ ;
3.  $Q(x, y) = x^2 - y^2$ ;
4.  $Q(x, y) = x^2, Q \geq 0$ ;
5.  $Q(x, y) = -x^2, Q \leq 0$ .

# Лекция 28 от 19.04.2016

## Ортогонализация

Пусть  $V$  — векторное пространство над полем  $F$  размерности  $n$ , и  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — его базис. Пусть также  $Q: V \rightarrow F$  — квадратичная форма,  $\beta: V \times V \rightarrow F$  — соответствующая билинейная функция и  $B = B(\beta, e)$  — ее матрица.

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \vdots \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \vdots \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix}$$

Рассмотрим  $B_i$  — левые верхние  $i \times i$ -подматрицы. Например,  $B_1 = (b_{11})$ ,  $B_2 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}$  и так далее.

Матрица  $B_i$  — это матрица ограничения билинейной функции  $\beta$  на подпространство, натянутое на векторы  $(e_1, \dots, e_i)$ . Назовем *верхним угловым минором* число  $\delta_i = \det(B_i)$ . Также будем считать, что  $\delta_0 = 1$ .

**Определение.** Базис  $e$  называется *ортогональным* (по отношению к  $\beta$ ), если  $\beta(e_i, e_j) = 0$  для любых  $i \neq j$ . В ортогональном базисе матрица квадратичной формы имеет канонический вид.

**Теорема** (Метод ортогонализации Грама – Шмидта). *Предположим, что  $\delta_i \neq 0$  для всех  $i$ . Тогда существует единственный базис  $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$  в  $V$  такой, что*

1.  $e'$  — ортогональный

2.  $e'_1 = e_1$ ,  
 $e'_2 \in e_2 + \langle e'_1 \rangle$ ,  
 $e'_3 \in e_3 + \langle e'_1, e'_2 \rangle$ ,  
 $\dots$   
 $e'_n \in e_n + \langle e'_1, \dots, e'_{n-1} \rangle$

3.  $Q(e'_i) = \frac{\delta_i}{\delta_{i-1}}$  для всех  $i$ .

*Доказательство.* Индукция по  $n$ . База для  $n = 1$  очевидна.

Теперь пусть всё доказано для всех  $k < n$ . Докажем для  $n$ . По предположению индукции, существует единственный базис  $(e'_1, e'_2, \dots, e'_{n-1})$  с требуемыми свойствами.

Наблюдение:  $\langle e_i, \dots, e_n \rangle = \langle e'_i, \dots, e'_n \rangle$ .

Ищем  $e'_n$  в виде  $e'_n = e_n + \lambda_1 e'_1 + \dots + \lambda_{n-1} e'_{n-1}$ . Тогда для всех  $i$ :

$$\beta(e'_n, e'_i) = \beta(e_n, e'_i) + \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j \beta(e'_j, e'_i)$$

Чтобы выполнялись требуемые условия, необходимо, чтобы эта сумма равнялась нулю.

Заметим, что последнее слагаемое обращается в нуль при  $i \neq j$  по свойству выбранного базиса. Тогда остается только следующее:

$$0 = \beta(e_n, e'_i) + \lambda_i \beta(e'_i, e'_i) = \beta(e_n, e'_i) + \lambda_i Q(e'_i) = \beta(e_n, e'_i) + \lambda_i \underbrace{\delta_{i-1}}_{\neq 0}.$$

Выбирая  $\lambda_i = -\frac{\beta(e_n, e'_i)}{\beta(e'_i, e'_i)}$ , получаем нужное равенство и однозначность разложения. Таким образом, условия 1 и 2 выполнены.

Проверим условие 3. Пусть  $C$  — матрица перехода от  $e$  к  $e'$ . Тогда легко понять, что  $C$  — верхнетреугольная с единицами на главной диагонали. Значит, матрица  $B' = C^T B C$  тоже диагональна. Заметим также, что  $C_i$  (та самая верхняя  $i \times i$ -подматрица) является матрицей перехода от  $(e_1, \dots, e_i)$  к  $(e'_1, \dots, e'_i)$ . Тогда:

$$B'_i = C_i^T B_i C_i \Rightarrow \det B'_i = 1 \cdot \det(B_i) \cdot 1 = \delta_i.$$

Но поскольку  $B' = \begin{pmatrix} Q(e'_1) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & Q(e'_n) \end{pmatrix}$ , то  $\delta_n = Q(e'_1) \cdot \dots \cdot Q(e'_n)$ . Отсюда и получаем, что

$$\frac{\delta_n}{\delta_{n-1}} = Q(e'_n).$$

□

**Пример.** Пусть  $V = \mathbb{R}^2$ . Тогда  $e'_1 = e_1$ , а  $e'_2$  получается, если спроецировать вектор  $e_2$  на прямую, ортогональную  $e_1$ . Если  $V = \mathbb{R}^3$ , то  $e'_3$  является проекцией на прямую, ортогональную плоскости  $(e'_1, e'_2)$ .

## Теорема Якоби и критерий Сильвестра

Рассмотрим следствия данной теоремы для случая, когда  $F = \mathbb{R}$ .

**Теорема (Якоби).** Пусть  $\delta_i \neq 0$  для всех  $i$ . Тогда  $\text{rk } Q = n$  и  $i_-(Q)$  равен числу перемен знака последовательности  $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_n$  (напомним, что  $\delta_0 = 1$ ).

*Доказательство.* Применим процесс ортогонализации. Получим базис  $(e'_1, \dots, e'_n)$ , в котором

$$Q(y_1, \dots, y_n) = \frac{\delta_1}{\delta_0} y_1^2 + \dots + \frac{\delta_n}{\delta_{n-1}} y_n^2, \text{ где } y_1, \dots, y_n \text{ — координаты некоторого вектора в данном}$$

базисе. Если для некоторого  $i$  выполняется, что  $\frac{\delta_i}{\delta_{i-1}} < 0$ , то значит,  $\text{sgn } \delta_i \neq \text{sgn } \delta_{i-1}$ . Что и означает, что отрицательный индекс равен количеству перемен знака в последовательности  $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_n$ .

Что касательно определителя, то условие  $\text{rk } Q = n$  равносильно условию  $\det B \neq 0$ . Но  $\det B = \delta_n \neq 0$ , а значит, все верно. □

**Теорема (Критерий Сильвестра).**  $Q > 0$  тогда и только тогда, когда  $\delta_i > 0$  для всех  $i$ .

*Доказательство.*

[ $\Leftarrow$ ] Следует из предыдущей теоремы.

[ $\Rightarrow$ ] Докажем, что  $\delta_i = \det(B_i) > 0$ . Действительно,  $B_i$  — это матрица ограничения  $Q|_{\langle e_1, \dots, e_i \rangle}$ .

Оно так же будет строго положительным, следовательно, существует матрица  $C_i \in M_n(\mathbb{R})$ ,  $\det(C_i) \neq 0$ , такая, что  $C_i^T B C_i = E$ . Но тогда  $\det C_i^T \det B_i \det C_i = \det E = 1$ . Следовательно,

$$\det B_i = \frac{1}{(\det C_i)^2} > 0, \text{ что и требовалось.}$$

□

**Теорема.**  $Q < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \delta_i < 0, & 2 \nmid i \\ \delta_i > 0, & 2 \mid i \end{cases}$

*Доказательство.* Применяя критерий Сильвестра для  $B(Q, \mathfrak{e}) = -B(-Q, \mathfrak{e})$ , получаем требуемое.  $\square$

## Евклидовы пространства. Основные понятия

**Определение.** Евклидово пространство — это векторное пространство  $\mathbb{E}$  над полем  $\mathbb{R}$ , на котором задана положительно определённая симметрическая билинейная функция  $(\cdot, \cdot)$ , которую мы будем называть скалярным произведением.

**Пример.**

$$1. \mathbb{R}^n, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, (x, y) = \sum_{i=1}^n x_i y_i.$$

$$2. \mathbb{E} = C[0, 1], (f, g) = \int_0^1 f(x)g(x)dx, (f, f) = \int_0^1 f^2(x)dx > 0.$$

**Замечание.** Важно отметить, что евклидово пространство можно определить только над полем  $\mathbb{R}$ .

**Определение.** Пусть  $x \in \mathbb{E}$ . Тогда длиной вектора называют величину  $|x| = \sqrt{(x, x)}$ .

Очевидно, что  $|x| \geq 0$ , причем  $|x| = 0$  тогда и только тогда, когда  $x = 0$ .

**Предложение** (Неравенство Коши-Буняковского). Пусть  $x, y \in \mathbb{E}$ . Тогда  $|(x, y)| \leq |x||y|$ , причём знак равенства возможен тогда и только тогда, когда  $x$  и  $y$  пропорциональны.

*Доказательство.*

1.  $x, y$  пропорциональны, т.е.  $x = \lambda y$  для некоторого  $\lambda$ . Тогда:

$$|(x, y)| = |(x, \lambda x)| = \lambda |(x, x)| = |x|\lambda|x| = |x||y|.$$

2.  $x, y$  линейно независимы. Тогда они будут базисом своей линейной оболочки. Тогда матрица  $B$  билинейной функции  $(\cdot, \cdot)|_{\langle x, y \rangle}$  равна:

$$B = \begin{pmatrix} (x, x) & (x, y) \\ (y, x) & (y, y) \end{pmatrix}$$

Так как  $\det B > 0$ , то  $(x, x)(y, y) - (x, y)^2 > 0$ . Следовательно:

$$\begin{aligned} |(x, y)|^2 &< |x|^2|y|^2 \\ |(x, y)| &< |x||y| \end{aligned}$$

$\square$

**Определение.** Углом между векторами  $x$  и  $y$  называют такой  $\alpha$ , что  $\cos \alpha = \frac{(x, y)}{|x||y|}$ .

Рассмотрим систему векторов  $(v_1, \dots, v_k)$ , где  $v_i \in \mathbb{E}$ .

**Определение.** Матрица Грама системы  $v_1, \dots, v_k$  это

$$G(v_1, \dots, v_k) := (g_{ij}), \quad g_{ij} = (v_i, v_j).$$

**Предложение.**

1.  $\det G(v_1, \dots, v_k) \geq 0$
2.  $\det G(v_1, \dots, v_k) = 0$  тогда и только тогда, когда  $v_1, \dots, v_k$  линейно зависимы.

*Доказательство.*

1.  $v_1, \dots, v_k$  линейно независимы. Следовательно, матрица  $G(v_1, \dots, v_k)$  является матрицей ограничения  $(\cdot, \cdot)$  на  $\langle v_1, \dots, v_k \rangle$ , базисом в котором является  $(v_1, \dots, v_k)$ . А значит,  $\det G(v_1, \dots, v_k) > 0$ .
2.  $v_1, \dots, v_k$  линейно зависимы. Значит, существуют коэффициенты  $(\lambda_1, \dots, \lambda_k) \neq (0, \dots, 0)$  такие, что  $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k = 0$ . Если обозначить матрицу Грама  $G(v_1, \dots, v_k)$  за  $G$ , то тогда

$$\begin{aligned} \lambda_1 G_{(1)} + \dots + \lambda_k G_{(k)} &= \\ &= (\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k, v_1) + (\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k, v_2) + \dots + (\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k, v_k) = \\ &= 0 + 0 + \dots + 0 \end{aligned}$$

То есть строки линейно зависимы и  $\det G = 0$ .

□



# Лекция 29 от 27.04.2016

## Ортогональные дополнения

Пусть  $\mathbb{E}$  — евклидово пространство,  $\dim \mathbb{E} = n$ .

**Определение.** Векторы  $x, y$  называются ортогональными, если  $(x, y) = 0$ . Обозначение:  $x \perp y$ .

**Определение.** Пусть  $S \subseteq \mathbb{E}$  — произвольное подпространство. Ортогональным дополнением к  $S$  называется множество  $S^\perp = \{x \in \mathbb{E} \mid (x, y) = 0 \forall y \in S\}$ .

**Замечание.**

1.  $S^\perp$  — подпространство в  $\mathbb{E}$ .
2.  $S^\perp = \langle S \rangle^\perp$ .

**Предложение.** Пусть  $S$  — подпространство в  $\mathbb{E}$ . Тогда:

1.  $\dim S^\perp = n - \dim S$ ;
2.  $\mathbb{E} = S \oplus S^\perp$ ;
3.  $(S^\perp)^\perp = S$ .

*Доказательство.*

1. Выделим в  $S$  базис  $(e_1, \dots, e_k)$  и дополним его векторами  $(e_{k+1}, \dots, e_n)$  до базиса  $\mathbb{E}$ . Рассмотрим вектор  $x \in \mathbb{E}$  и представим его в виде  $x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$ . Если  $x \in S^\perp$ , то это то же самое, если  $(x, e_i) = 0$  для  $i = 1 \dots k$ . Итого:

$$(x, e_i) = (e_1, e_i)x_1 + (e_2, e_i)x_2 + \dots + (e_n, e_i)x_n = 0, \quad i = 1 \dots k$$

Получим однородную СЛУ  $G \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = 0$ , где  $G \in \text{Mat}_{k \times n}(\mathbb{R})$  и  $g_{ij} = (e_i, e_j)$ . Заметим,

что  $\text{rk } G = k$ , так как это часть матрицы Грама, и ее левый верхний  $k \times k$  минор больше нуля. Следовательно, размерность пространства решений  $\dim S^\perp = n - \text{rk } G = n - \dim S$ .

2. Из предыдущего пункта получаем, что  $\dim S + \dim S^\perp = n$ . Вместе с тем, поскольку  $(x, x) = 0$  тогда и только тогда, когда  $x = 0$ , то  $S \cap S^\perp = \{0\}$ . Следовательно,  $\mathbb{E} = S \oplus S^\perp$ .
3.  $S \subset (S^\perp)^\perp$  — всегда. Вместе с тем,  $\dim(S^\perp)^\perp = n - \dim S^\perp = n - (n - k) = k = \dim S$ . И так как размерности совпадают, то  $S = (S^\perp)^\perp$ .

□

Итак, мы теперь знаем, что  $\mathbb{E} = S \oplus S^\perp$ . Значит, для  $x \in \mathbb{E}$  существует единственное представление его в виде  $x = y + z$ , где  $y \in S$ ,  $z \in S^\perp$ .

**Определение.** Вектор  $y$  называется ортогональной проекцией вектора  $x$  на подпространство  $S$ . Обозначение:  $\text{pr}_S x$ .

Вектор  $z$  называется ортогональной составляющей вектора  $x$  вдоль подпространства  $S$ . Обозначение:  $\text{ort}_S x$ .

## Ортогональные и ортонормированные базисы. Свойства

**Определение.** Базис  $(e_1, \dots, e_n)$  в  $\mathbb{E}$  называется ортогональным, если  $(e_i, e_j) = 0 \ \forall i \neq j$ . Это равносильно тому, что  $G(e_1, \dots, e_n)$  диагональна.

Базис называется ортонормированным, если дополнительно  $(e_i, e_i) = 1 \ \forall i$ . Это равносильно тому, что  $G(e_1, \dots, e_n) = E$ .

**Замечание.** Если  $(e_1, \dots, e_n)$  ортогональный базис, то  $\left(\frac{e_1}{|e_1|}, \dots, \frac{e_n}{|e_n|}\right)$  ортонормированный.

**Теорема.** В любом конечномерном евклидовом пространстве существует ортонормированный базис.

*Доказательство.* Следует из того, что всякую положительно определенную квадратичную форму можно привести к нормальному виду.  $\square$

Пусть  $(e_1, \dots, e_n)$  — ортонормированный базис в  $\mathbb{E}$ . Пусть также есть ещё один базис  $(e'_1, \dots, e'_n)$ , причём  $(e'_1, \dots, e'_n) = (e_1, \dots, e_n)C$ .

**Предложение.**  $(e'_1, \dots, e'_n)$  — ортонормированный тогда и только тогда, когда  $C^T C = E$  или, что то же самое,  $C^{-1} = C^T$ .

*Доказательство.* Условие, что базис  $(e'_1, \dots, e'_n)$  является ортонормированным, равносильно тому, что  $G(e'_1, \dots, e'_n) = E$ . С другой стороны,  $G(e'_1, \dots, e'_n) = C^T G(e_1, \dots, e_n) C$ , причем аналогично  $G(e_1, \dots, e_n) = E$ . Откуда и следует, что  $C^T C = E$ .  $\square$

**Определение.** Матрица  $C$  в таком случае называется ортогональной.

**Свойства.**

1.  $C^T C = E$ , значит,  $C^T = C^{-1}$ , и тогда  $CC^T = E$ . Итого, получаем:

$$\sum_{k=1}^n c_{ki} c_{kj} = \delta_{ij} = \sum_{k=1}^n c_{ik} c_{jk}$$

Напомним, что  $\delta_{ij}$  это символ Кронекера.

2.  $\det C = \pm 1$ .

**Пример.**  $C = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$  — матрица поворота на угол  $\varphi$  в  $\mathbb{R}^2$ .

Пусть  $S \subseteq \mathbb{E}$  — подпространство,  $(e_1, \dots, e_k)$  — его ортогональный базис,  $x \in \mathbb{E}$ .

**Предложение.**  $\text{pr}_S x = \sum_{i=1}^k \frac{(x, e_i)}{(e_i, e_i)} e_i$ . В частности, если базис ортонормированный,

$$\text{pr}_S x = \sum_{i=1}^k (x, e_i) e_i$$

*Доказательство.* Представим вектор  $x$  в виде суммы  $x = \text{pr}_S x + \text{ort}_S x$ . Тогда:

$$(x, e_i) = (\text{pr}_S x, e_i) + \underbrace{(\text{ort}_S x, e_i)}_{=0} = (\text{pr}_S x, e_i) \quad i = 1, \dots, k.$$

Вместе с тем,  $\text{pr}_S x = \sum_{j=1}^k \lambda_j e_j$ , следовательно,  $(x, e_i) = \sum_{j=1}^k \lambda_j (e_j, e_i)$ . Но так как базис ортогональный, все слагаемые, кроме одного, занулятся, и останется только  $(x, e_i) = \lambda_i (e_i, e_i)$ . Откуда и следует, что  $\lambda_i = \frac{(x, e_i)}{(e_i, e_i)}$ .  $\square$

Пусть есть базис  $(e_1, \dots, e_n)$  в  $\mathbb{E}$ . Процесс ортогонализации Грама-Шмидта даёт ортогональный базис  $(f_1, \dots, f_n)$ , причем:

$$\begin{aligned} f_1 &= e_1 \\ f_2 &\in e_2 + \langle e_1 \rangle \\ &\dots \\ f_n &\in e_n + \langle e_1, \dots, e_{n-1} \rangle \end{aligned}$$

Точно так же можно заметить, что  $\langle f_1, \dots, f_i \rangle = \langle e_1, \dots, e_i \rangle$  для всех  $i = 1, \dots, n$ .

**Предложение.**  $f_i = \text{ort}_{\langle e_1, \dots, e_{i-1} \rangle} e_i$  для всех  $i = 1, \dots, n$ .

*Доказательство.* Воспользовавшись равенством линейных оболочек, получаем, что  $e_i \in f_i + \langle f_1, \dots, f_{i-1} \rangle$ . Следовательно, данный базисный вектор можно представить в виде  $e_i = f_i + \lambda_1 f_1 + \dots + \lambda_{i-1} f_{i-1}$ . И из того, что  $f_i \perp \langle e_1, \dots, e_{i-1} \rangle = \langle f_1, \dots, f_{i-1} \rangle$  как раз и получаем, что  $f_i = \text{ort}_{\langle e_1, \dots, e_{i-1} \rangle} e_i$ .  $\square$

**Пример.** Данное рассуждение проще понять, если представить себе частный случай для  $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$ .

У нас зафиксированы векторы  $e_1, e_2, e_3$ , и мы их ортогонализируем. Для начала,  $f_1 = e_1$ . Вектор  $f_2$  получается как проекция вектора  $e_2$  на прямую, ортогональную  $f_1$ . А вектор  $f_3$  — как проекция  $e_3$  на прямую, ортогональную плоскости, образованной векторами  $f_1$  и  $f_2$ . Аналогично для пространств большей размерности.

**Теорема (Пифагора).** Если  $x, y \in \mathbb{E}$  и  $x \perp y$ , то  $|x + y| = |x|^2 + |y|^2$ .

*Доказательство.*

$$|x + y|^2 = (x + y, x + y) = (x, x) + (y, y) + \underbrace{(x, y)}_{=0} + \underbrace{(y, x)}_{=0} = (x, x) + (y, y) = |x|^2 + |y|^2$$

$\square$

## Расстояния в евклидовых пространствах

Рассмотрим векторы  $x, y \in \mathbb{E}$ .

**Определение.** Расстоянием между векторами  $x$  и  $y$  называется число  $\rho(x, y) := |x - y|$ .

**Предложение** (Неравенство треугольника).  $\rho(a, b) + \rho(b, c) \geq \rho(a, c)$  при  $a, b, c \in \mathbb{E}$ .

*Доказательство.* Пусть  $x = a - b$ ,  $y = b - c$ . Тогда  $a - c = x + y$ . Теперь достаточно доказать, что  $|x| + |y| \geq |x + y|$ . Для этого рассмотрим  $|x + y|^2$ .

$$|x + y|^2 = (x, x) + 2(x, y) + (y, y) = |x|^2 + 2(x, y) + |y|^2 \leq |x|^2 + 2|x||y| + |y|^2 = (|x| + |y|)^2$$

Сравнивая начало и конец неравенства, получаем, что  $|x + y| \leq |x| + |y|$ .  $\square$

Пусть  $P$  и  $Q$  — два произвольных подмножества  $\mathbb{E}$ .

**Определение.** Расстоянием между  $P$  и  $Q$  называют величину

$$\rho(P, Q) := \inf\{\rho(x, y) \mid x \in P, y \in Q\}.$$

Пусть  $x \in \mathbb{E}$  и  $U \subseteq \mathbb{E}$  — подпространство.

**Теорема.**  $\rho(x, U) = |\text{ort}_U x|$ , причём  $\text{pr}_U x$  — единственный ближайший к  $x$  вектор из  $U$ .

*Доказательство.* Пусть  $y = \text{pr}_U x$  и  $z = \text{ort}_U x$ . Пусть также  $y' \in U \setminus \{0\}$ , тогда:

$$\rho(x, y + y') = |x - y - y'| = |z - y'| = \sqrt{|z|^2 + \underbrace{|y'|^2}_{>0}} > |z| = \rho(x, y).$$

Из того, что вектор  $z$ , которым мы ограничи снизу, определяется однозначно, и следует, что существует единственный ближайший вектор к  $x$  из  $U$ .  $\square$

Пусть  $U \subseteq \mathbb{E}$  — подпространство,  $x \in \mathbb{E}$ ,  $(e_1, \dots, e_k)$  — базис  $U$ .

**Теорема.**  $(\rho(x, U))^2 = \frac{\det G(e_1, \dots, e_k, x)}{\det G(e_1, \dots, e_k)}$

*Доказательство.* Разобьем на два случая: когда  $x$  лежит в  $U$  и когда не лежит.

1.  $x \in U$ . Тогда  $\rho(x, U) = 0$ . Но с другой стороны,  $\det G(e_1, \dots, e_k, x) = 0$ , поскольку эти векторы линейно зависимы, и значит, равенство выполняется.
2.  $x \notin U$ . Тогда  $\rho(x, U) = |\text{ort}_U x| = |z|$ . Ортогонализация Грама-Шмидта к  $(e_1, \dots, e_k, x)$  даст нам  $(f_1, \dots, f_k, z)$ , причём  $|z|^2 = (z, z) = \frac{\delta_{k+1}}{\delta_k} = \frac{\det G(e_1, \dots, e_k, x)}{\det G(e_1, \dots, e_k)}$ .

$\square$

# Лекция 30 от 11.05.2016

## $N$ -мерные параллелепипеды в евклидовых пространствах

Пусть  $\mathbb{E}$  — евклидово пространство. Вспомним, что такое расстояния в нем.

Для векторов  $x, y \in E$  расстояние это  $\rho(x, y) := |x - y|$ .

Для подмножеств  $P, Q \subseteq \mathbb{E}$  расстояние это  $\rho(P, Q) := \inf_{x \in P, y \in Q} \rho(x, y)$ .

Для подпространства  $U \subseteq \mathbb{E}$  и вектора  $x \in \mathbb{E}$  известны следующие вещи:

1.  $\rho(x, U) = |\text{ort}_U x|$
2.  $\rho(x, U)^2 = \frac{\det G(e_1, \dots, e_k, x)}{\det G(e_1, \dots, e_k)}$ , где  $e_1, \dots, e_k$  — базис в  $U$ .

Рассмотрим теперь векторы  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{E}$ , причем  $n$  — необязательно размерность  $\mathbb{E}$ .

**Определение.**  $N$ -мерным параллелепипедом, натянутым на векторы  $a_1, \dots, a_n$  называется подмножество

$$P(a_1, \dots, a_n) := \left\{ x = \sum_{i=1}^n x_i a_i \mid 0 \leq x_i \leq 1 \right\}.$$

**Пример.**

1. При  $n = 2$  это обычный двумерный параллелограмм.
2. При  $n = 3$  это трехмерный параллелепипед.

**Определение.** Для параллелепипеда  $P(a_1, \dots, a_n)$  основание это  $P(a_1, \dots, a_{n-1})$ , а высота —  $h = \text{ort}_{\langle a_1, \dots, a_{n-1} \rangle} a_n$ .

**Определение.** Объем  $n$ -мерного параллелепипеда  $P(a_1, \dots, a_n)$  — это число  $\text{vol } P(a_1, \dots, a_n)$ , определяемое рекурсивно следующим образом:

$$\begin{aligned} n = 1 & \quad \text{vol } P(a_1) = |a_1| \\ n > 1 & \quad \text{vol } P(a_1, \dots, a_n) = \text{vol } P(a_1, \dots, a_{n-1}) \cdot |h| \end{aligned}$$

**Теорема.**  $\text{vol } P(a_1, \dots, a_n)^2 = \det G(a_1, \dots, a_n)$ .

*Доказательство.* Докажем это утверждение по индукции.

База: при  $n = 1$  имеем  $\text{vol } P(a_1)^2 = |a_1|^2 = (a_1, a_1) = \det G(a_1)$ .

Теперь пусть утверждение доказано для всех меньших значений. Докажем для  $n$ .

$$\begin{aligned} \text{vol } P(a_1, \dots, a_n)^2 &= \text{vol } P(a_1, \dots, a_{n-1})^2 \cdot |h|^2 = \det G(a_1, \dots, a_{n-1}) \cdot |\text{ort}_{\langle a_1, \dots, a_{n-1} \rangle} a_n|^2 = \\ &= \begin{cases} 0 = \det G(a_1, \dots, a_n), & \text{если } a_1, \dots, a_{n-1} \text{ линейно зависимы} \\ \det G(a_1, \dots, a_n) \frac{\det G(a_1, \dots, a_n)}{\det G(a_1, \dots, a_{n-1})} = \det G(a_1, \dots, a_n), & \text{если } a_1, \dots, a_{n-1} \text{ линейно независимы} \end{cases} \end{aligned}$$

□

**Следствие.** Объем параллелепипеда не зависит от выбора основания.

**Теорема.** Пусть  $(e_1, \dots, e_n)$  — ортогональный базис в  $\mathbb{E}$ , и  $(a_1, \dots, a_n) = (e_1, \dots, e_n)A$  для некоторой матрицы  $A \in M_n(\mathbb{R})$ . Тогда  $\text{vol } P(a_1, \dots, a_n) = |\det A|$ .

**Замечание.** Это — геометрический смысл определителя!

*Доказательство.* Вспомним, что матрица Грама ортогонального базиса равна единичной матрице:

$$G(a_1, \dots, a_n) = A^T G(e_1, \dots, e_n) A = A^T A.$$

Тогда для определителя справедливо следующее:

$$\det G(a_1, \dots, a_n) = \det(A^T A) = (\det A)^2.$$

Осталось воспользоваться предыдущей теоремой:

$$\text{vol } P(a_1, \dots, a_n) = \sqrt{\det G(a_1, \dots, a_n)} = |\det A|.$$

□

## Изоморфизм евклидовых пространств

Теперь рассмотрим два евклидовых пространства,  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{E}'$ .

**Определение.** Изоморфизм евклидовых пространств  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{E}'$  — это биективное отображение  $\varphi : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}'$  такое, что

1.  $\varphi$  — изоморфизм векторных пространств.
2.  $(\varphi(x), \varphi(y))' = (x, y)$  для любых  $x \in \mathbb{E}$  и  $y \in \mathbb{E}'$ . Здесь через  $()'$  обозначается скалярное произведение в  $\mathbb{E}'$ .

**Определение.** Евклидовы пространства  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{E}'$  называются изоморфными, если между ними существует изоморфизм. Обозначение:  $\mathbb{E} \simeq \mathbb{E}'$ .

**Теорема.** Два конечномерных евклидовых пространства  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{E}'$  изоморфны тогда и только тогда, когда их размерности совпадают.

*Доказательство.*

[ $\Rightarrow$ ] Очевидно из первого пункта определения изоморфизма евклидовых пространств.

[ $\Leftarrow$ ] Зафиксируем ортонормированные базисы  $e = (e_1, \dots, e_n)$  в  $\mathbb{E}$  и  $e' = (e'_1, \dots, e'_n)$  в  $\mathbb{E}'$ , где  $n = \dim \mathbb{E} = \dim \mathbb{E}'$ . Зададим изоморфизм  $\varphi : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}'$  векторных пространств по формуле

$$\varphi(e_i) = e'_i \quad \forall i = 1, \dots, n.$$

Тогда имеем следующее (напомним, что  $\delta_{ij}$  это символ Кронекера):

$$(\varphi(e_i), \varphi(e_j))' = (e'_i, e'_j)' = \delta_{ij} = (e_i, e_j).$$

Теперь рассмотрим векторы  $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$  и  $y = \sum_{j=1}^n y_j e_j$  и проверим второй пункт определения изоморфизма евклидовых пространств. Будем пользоваться билинейностью скалярного произведения.

$$\begin{aligned} (\varphi(x), \varphi(y))' &= \left( \varphi \left( \sum_{i=1}^n x_i e_i \right), \varphi \left( \sum_{j=1}^n y_j e_j \right) \right)' = \left( \sum_{i=1}^n x_i \varphi(e_i), \sum_{j=1}^n y_j \varphi(e_j) \right)' = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i y_j \varphi(e_i, e_j)' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i y_j (e_i, e_j) = (x, y) \end{aligned}$$

□

# Линейные операторы в евклидовых пространствах

Пусть  $\mathbb{E}$  — евклидово пространство,  $\varphi$  — его линейный оператор. Тогда ему можно сопоставить две билинейные функции на  $\mathbb{E}$ :

$$\beta_\varphi(x, y) = (x, \varphi(y))$$

$$\beta_\varphi^T(x, y) = (\varphi(x), y)$$

Введем базис  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  в  $\mathbb{E}$ , матрицу Грама  $G = G(e_1, \dots, e_n)$ , матрицу оператора  $A_\varphi = A(\varphi, \mathfrak{e})$ , а также два вектора  $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$  и  $y = \sum_{j=1}^n y_j e_j$ . Тогда имеем следующее:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= A_\varphi \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} & \varphi(y) &= A_\varphi \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \\ \beta_\varphi(x, y) &= (x_1, \dots, x_n) G A_\varphi \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} & \beta_\varphi^T(x, y) &= (x_1, \dots, x_n) A_\varphi^T G \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Отсюда мы можем вывести матрицы данных билинейных форм:

$$B(\beta_\varphi, \mathfrak{e}) = G A_\varphi$$

$$B(\beta_\varphi^T, \mathfrak{e}) = A_\varphi^T G$$

**Замечание.** *Отображения  $\varphi \mapsto \beta_\varphi$  и  $\varphi \mapsto \beta_\varphi^T$  являются биекциями между  $L(\mathbb{E})$  и пространством всех билинейных форм на  $\mathbb{E}$ .*

**Определение.** *Линейный оператор  $\psi \in L(\mathbb{E})$  называется сопряженным к  $\varphi$ , если для всех векторов  $x, y \in \mathbb{E}$  верно, что  $(\psi(x), y) = (x, \varphi(y))$ . Это также равносильно тому, что  $\beta_\psi^T = \beta_\varphi$ . Обозначение:  $\psi = \varphi^*$ .*

**Предложение.**

1.  $\varphi^*$  существует и единственен.
2.  $A_{\varphi^*} = G^{-1} A_\varphi^T G$ , где  $A_{\varphi^*} = A(\varphi^*, \mathfrak{e})$ , а все остальные обозначения прежние. В частности, если  $\mathfrak{e}$  — ортонормированный базис, то  $A_{\varphi^*} = A_\varphi^T$ .

*Доказательство.* Снова обозначим  $\varphi^*$  как  $\psi$ . Мы уже знаем, что  $B(\beta_\psi^T, \mathfrak{e}) = A_\psi^T G$  и  $B(\beta_\varphi, \mathfrak{e}) = G A_\varphi$ . Мы хотим, чтобы эти две матрицы были равны. Транспонируем их и, воспользовавшись тем, что  $G = G^T$ , получаем:

$$G A_\psi = A_\varphi^T G.$$

Выразив  $A_\psi$ , получаем, что такая матрица (и, соответственно, оператор) единственная:

$$A_\psi = G^{-1} A_\varphi^T G.$$

Существование же напрямую следует из того, что линейный оператор с матрицей  $G^{-1} A_\varphi^T G$  обладает нужными свойствами.  $\square$

**Определение.** *Линейный оператор  $\varphi$  называется самосопряженным (симметрическим), если  $\varphi^* = \varphi$ . Это равносильно тому, что  $(\varphi(x), y) = (x, \varphi(y))$  для любых векторов  $x, y \in \mathbb{E}$ .*

**Замечание.** *В случае, когда  $\mathfrak{e}$  — ортонормированный базис в  $\mathbb{E}$  и  $A_\varphi = A(\varphi, \mathfrak{e})$ , то самосопряженность линейного оператора  $\varphi$  равносильно тому, что  $A_\varphi = A_\varphi^T$ . Отсюда и второе название таких операторов — симметрические.*

Здесь важно, что мы работаем именно над евклидовым пространством, так как мы использовали скалярное произведение для проведения биекции с билинейными формами.

**Пример.** Пусть  $U \subseteq \mathbb{E}$  — подпространство. Отображение  $\varphi : x \mapsto \text{pr}_U x$  является самосопряженным.

*Доказательство.*

**I способ (координатный).**

Пусть  $(e_1, \dots, e_k)$  — ортонормированный базис в  $U$ , а  $(e_{k+1}, \dots, e_n)$  — ортонормированный базис в  $U^\perp$ . Тогда  $\mathfrak{e} = (e_1, \dots, e_n)$  — ортонормированный базис в  $\mathbb{E}$ . А значит, матрица  $\varphi$  будет иметь в таком базисе следующий вид:

$$A(\varphi, \mathfrak{e}) = \text{diag}(\underbrace{1, \dots, 1}_k, \underbrace{0, \dots, 0}_{n-k})$$

При транспонировании диагональная матрица не меняется, следовательно,  $A(\varphi, \mathfrak{e})^T = A(\varphi, \mathfrak{e})$ . Что и означает, что  $\varphi = \varphi^*$ .

**II способ (бескоординатный).**

Проверим условие  $(x, \varphi(y)) = (\varphi(x), y)$ :

$$\begin{aligned} (\varphi(x), y) &= (\text{pr}_U x, \text{pr}_U y + \text{ort}_U y) = (\text{pr}_U x, \text{pr}_U y) + \underbrace{(\text{pr}_U x, \text{ort}_U y)}_{=0} = \\ &= (\text{pr}_U x, \text{pr}_U y) + \underbrace{(\text{ort}_U x, \text{pr}_U y)}_{=0} = (\text{pr}_U x + \text{ort}_U x, \text{ort}_U y) = (x, \varphi(y)). \end{aligned}$$

□



# Лекция 31 от 17.05.2016

## Самосопряжённые линейные операторы (продолжение)

Пусть  $\mathbb{E}$  — евклидово пространство,  $\dim \mathbb{E} = n$ ,  $\varphi \in L(\mathbb{E})$ . Вспомним, что по определению сопряжённый линейный оператор  $\varphi^*$  это такой линейный оператор, для которого выполняется следующее:

$$(x, \varphi(y)) = (\varphi^*(x), y).$$

Вспомним также, что самосопряженным называется такой оператор  $\varphi$ , для которого  $\varphi^* = \varphi$ .

**Предложение.** Пусть  $\varphi$  — самосопряженный линейный оператор в  $\mathbb{E}$ . Если  $U \subseteq \mathbb{E}$  —  $\varphi$ -инвариантное подпространство в  $\mathbb{E}$ , то  $U^\perp$  тоже  $\varphi$ -инвариантно.

Поясним, что означает этот факт.

Пусть  $\dim U = m$  и  $U = \langle e_1, \dots, e_m \rangle$ . Так как  $\mathbb{E} = U \oplus U^\perp$ , то  $\dim U^\perp = n - m$  и  $U^\perp = \langle e_{m+1}, \dots, e_n \rangle$ , где  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — базис  $\mathbb{E}$ .

Тогда матрица  $\varphi$  в базисе  $e$  имеет следующий блочный вид:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad A \in M_m, D \in M_{n-m}.$$

Когда  $U$  —  $\varphi$ -инвариантно, то есть  $\varphi(U) \subseteq U$ , эта матрица принимает вид  $\begin{pmatrix} A & B \\ 0 & D \end{pmatrix}$ , так как базисные векторы  $e_1, \dots, e_m$  переходят в себя, не затрагивая векторы  $e_{m+1}, \dots, e_n$ . И мы хотим доказать, что  $U^\perp$  тоже является  $\varphi$ -инвариантным подпространством, то есть блок  $B$  также равен нулю, то есть матрица  $\varphi$  в базисе  $e$  имеет вид  $\begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & D \end{pmatrix}$ .

*Доказательство.* Известно, что  $\varphi = \varphi^*$  и  $\varphi(U) \subseteq U$ . Мы хотим, чтобы  $\varphi(U^\perp) \subseteq U^\perp$ . Для этого нам достаточно показать, что  $(x, \varphi(y)) = 0$  для любых векторов  $x \in U$  и  $y \in U^\perp$ .

$$(x, \varphi(y)) = (\varphi^*(x), y) = \underbrace{(\varphi(x), y)}_{\substack{\in U \\ \in U^\perp}} = 0$$

□

**Предложение.** У самосопряжённого оператора  $\varphi$  есть собственный вектор над  $\mathbb{R}$ .

*Доказательство.* Ранее в курсе мы уже доказывали, что у  $\varphi$  существует одномерное или двумерное  $\varphi$ -инвариантное подпространство. Рассмотрим соответствующие случаи.

1. Если существует одномерное  $\varphi$ -инвариантное подпространство, то его порождающий вектор является собственным.
2. Пусть  $U \subseteq \mathbb{E}$  — двумерное  $\varphi$ -инвариантное подпространство и  $e = (e_1, e_2)$  — его ортонормированный базис. Пусть  $\psi \in L(U)$  — ограничение  $\varphi$  на  $U$ . В прошлый раз мы уже доказывали, что матрица  $\psi$  имеет симметрический вид, то есть  $A(\psi, e) = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}$ .

Рассмотрим его характеристический многочлен:

$$\chi_\psi(t) = (-1)^2 \begin{vmatrix} a - t & b \\ b & c - t \end{vmatrix} = t^2 - (a + c)t + ac - b^2 = 0;$$
$$D = (a - c)^2 + 4b^2 \geq 0.$$

Так как дискриминант неотрицательный, то у  $\chi_\psi(t)$  есть хотя бы один корень. Следовательно, у  $\psi$  есть собственный вектор  $v$ . Но  $\psi$  — ограничение  $\varphi$ , так что вектор  $v$  тоже является для него собственным.

□

**Теорема.** У всякого самосопряжённого линейного оператора есть ортонормированный базис из собственных векторов. В частности,  $\varphi$  диагонализуем над  $\mathbb{R}$  и его характеристический многочлен разлагается в произведение линейных сомножителей.

**Следствие.** Всякая симметричная матрица над  $\mathbb{R}$  подобна диагональной.

*Доказательство.* Докажем индукцией по  $n$ .

Для  $n = 1$  всё очевидно. Если  $n > 1$ , то у  $\varphi$  есть собственный вектор  $v$ . Положим  $e_1 = \frac{v}{|v|}$  и  $U = \langle e_1 \rangle^\perp$ . Тогда  $\dim U = n - 1$ , причем  $U$  —  $\varphi$ -инвариантное подпространство (см. предыдущее предложение). По предположению индукции в  $U$  есть ортонормированный базис из собственных векторов  $(e_2, \dots, e_n)$ . Тогда  $(e_1, \dots, e_n)$  — искомый базис. □

**Следствие.** Пусть  $\varphi$  — самосопряжённый линейный оператор, и  $\lambda, \mu$  — его собственные значения. Тогда  $V_\lambda(\varphi) \perp V_\mu(\varphi)$  при  $\lambda \neq \mu$ .

*Доказательство.*

1. Координатный способ. Пусть  $e = (e_1, \dots, e_n)$  — ортонормированный базис из собственных векторов, где  $\varphi(e_i) = \lambda_i e_i$ . Тогда для произвольного вектора  $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$  из  $V$  верно, что  $\varphi(x) = x_1 \lambda_1 e_1 + \dots + x_n \lambda_n e_n$ .

Несложно понять, что если  $x \in V_\lambda(\varphi)$ , то есть  $\varphi(x) = \lambda x$ , то тогда  $x$  принадлежит линейной оболочке тех базисных векторов, чье собственное значение равно  $\lambda$ :  $x \in \langle e_i \mid \lambda_i = \lambda \rangle$ . А так как базисные векторы попарно ортогональны в силу свойств выбранного базиса, то как раз получаем, что  $V_\lambda(\varphi) \perp V_\mu(\varphi)$ , если  $\lambda \neq \mu$ .

2. Бескоординатный способ. Возьмем произвольные векторы  $x \in V_\lambda(\varphi)$  и  $y \in V_\mu(\varphi)$ . Тогда:

$$\lambda(x, y) = (\lambda x, y) = (\varphi(x), y) = (x, \varphi(y)) = (x, \mu y) = \mu(x, y).$$

А поскольку  $\lambda \neq \mu$ , то  $(x, y) = 0$ .

□

**Следствие** (Приведение квадратичной формы к главным осям). Для любой квадратичной формы  $Q$  над  $\mathbb{E}$  существует ортонормированный базис, в котором  $Q$  имеет канонический вид.

$$Q(x_1, \dots, x_n) = \lambda_1 x_1^2 + \dots + \lambda_n x_n^2.$$

Причем числа  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  определены однозначно с точностью до перестановки.

Это более сильное утверждение, чем мы доказывали ранее, так как теперь мы говорим именно про ортонормированный базис.

*Доказательство.* Существует единственный самосопряжённый линейный оператор  $\varphi$  в  $\mathbb{E}$  такой, что  $Q(v) = (v, \varphi(v))$ . Если  $e$  — ортонормированный базис, то матрица  $Q$  в базисе  $e$  будет равна матрице  $\varphi$  в базисе  $e$ . Числа  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  являются собственными значениями  $\varphi$ . □

**Следствие.** Пусть  $A \in M_n(\mathbb{R})$ ,  $A = A^T$ . Тогда существует ортогональная матрица  $C$  такая, что

$$C^T A C = C^{-1} A C = D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n).$$

# Ортогональные линейные операторы

**Определение.** Линейный оператор  $\varphi \in L(\mathbb{E})$  называется ортогональным, если

$$(\varphi(x), \varphi(y)) = (x, y), \quad \forall x, y \in \mathbb{E}.$$

Другими словами,  $\varphi$  сохраняет скалярное произведение, осуществляет изоморфизм  $\mathbb{E}$  на себя.

**Предложение.** Пусть  $\varphi$  — линейный оператор в  $\mathbb{E}$ . Тогда следующие условия эквивалентны:

1.  $\varphi$  — ортогональный линейный оператор;
2.  $|\varphi(x)| = |x|$  для всех  $x \in \mathbb{E}$ , то есть  $\varphi$  сохраняет длины;
3. существует  $\varphi^{-1}$ , причем  $\varphi^{-1} = \varphi^*$ , то есть  $\varphi \cdot \varphi^* = \varphi^* \cdot \varphi = \text{id}$ ;
4. если  $e$  — ортонормированный базис, то  $A(\varphi, e)$  — ортогональная матрица;
5. если  $(e_1, \dots, e_n)$  — ортонормированный базис, то  $(\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n))$  — тоже ортонормированный базис.

*Доказательство.* Везде здесь  $x, y \in \mathbb{E}$ .

$$(1) \Rightarrow (2)$$

$$|\varphi(x)| = \sqrt{(\varphi(x), \varphi(x))} = \sqrt{(x, x)} = |x|$$

$$(2) \Rightarrow (1) \text{ Используем поляризацию (см. лекция 26).}$$

$$(\varphi(x), \varphi(y)) = \frac{1}{2}(|\varphi(x+y)|^2 - |\varphi(x)|^2 - |\varphi(y)|^2) = \frac{1}{2}(|x+y|^2 - |x|^2 - |y|^2) = (x, y)$$

$$(1) \& (2) \Rightarrow (3) \text{ Найдем ядро } \varphi:$$

$$\varphi(x) = 0 \Rightarrow |\varphi(x)| = 0 \Rightarrow |x| = 0 \Rightarrow x = 0$$

Итого,  $\text{Ker } \varphi = \{0\}$ . Значит, существует  $\varphi^{-1}$ . Теперь докажем, что  $\varphi^{-1} = \varphi^*$ :

$$(\varphi^{-1}(x), y) = (\varphi(\varphi^{-1}(x)), \varphi(y)) = (x, \varphi(y))$$

Получили, что  $\varphi^{-1}$  является сопряженным к  $\varphi$  по определению.

$$(3) \Rightarrow (1)$$

$$(\varphi(x), \varphi(y)) = (\varphi^*(\varphi(x)), y) = (x, y)$$

$$(4) \Leftrightarrow (5) \text{ Пусть } e = (e_1, \dots, e_n) \text{ — ортонормированный базис. Тогда верно, что}$$

$$(\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)) = (e_1, \dots, e_n) \cdot C, \quad C = A(\varphi, e)$$

Матрица  $C$  является ортогональной тогда и только тогда, когда  $(\varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n))$  — ортонормированный базис.

$$(3) \Leftrightarrow (4) \text{ Пусть } e \text{ — ортонормированный базис, } C = A(\varphi, e). \text{ Тогда } A(\varphi^*, e) = C^T \text{ и условие, что } \varphi \cdot \varphi^* = \text{id} \text{ равносильно тому, что } C \cdot C^T = E, \text{ то есть } C \text{ — ортогональная матрица.}$$

□

**Пример.** Тут надо придумать, как записывать.

**Предложение.** Пусть  $\varphi$  — ортогональный линейный оператор в  $\mathbb{E}$ . Если  $U \subseteq \mathbb{E}$  —  $\varphi$ -инвариантное подпространство в  $\mathbb{E}$ , то  $U^\perp$  тоже  $\varphi$ -инвариантно.

*Доказательство.* Рассмотрим  $\psi$  — ограничение  $\varphi$  на  $U$ . Оно, очевидно, тоже сохраняет длины, то есть также является ортогональным оператором. Следовательно, существует  $\psi^{-1}$ .

Достаточно показать, что  $(x, \varphi(y)) = 0$  для любых векторов  $x \in U$  и  $y \in U^\perp$ .

$$(x, \varphi(y)) = (\psi(\psi^{-1}(x)), \varphi(y)) = (\varphi(\psi^{-1}(x)), \varphi(y)) = (\underbrace{\psi^{-1}(x)}_{\in U}, \underbrace{y}_{\in U^\perp}) = 0$$

□

Пусть  $\Pi(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ .

**Теорема.** Пусть  $\varphi$  — ортогональный линейный оператор в  $\mathbb{E}$ . Тогда существует ортонормированный базис  $\mathfrak{e}$  такой, что матрица  $A(\varphi, \mathfrak{e})$  имеет следующий блочно-диагональный вид:

$$A(\varphi, \mathfrak{e}) := \begin{pmatrix} \Pi(\alpha) & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & \Pi(\alpha) & & & & \\ & & & -1 & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & -1 & \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}.$$