

# Конспект билетов

## Аналитическая механика

### Содержание

<b>1 Кинематика точки. Траектория, скорость и ускорение точки. Скорость и ускорение точки в полярных координатах</b>	<b>5</b>
1.1 Кинематика точки . . . . .	5
1.2 Скорость и ускорение точки в полярных координатах . . . . .	5
<b>2 Кинематика точки. Естественный трёхгранник. Теорема Гюйгенса о разложении ускорения точки на тангенциальное и нормальное</b>	<b>5</b>
2.1 Кинематика точки. Естественный трёхгранник . . . . .	5
2.2 Теорема Гюйгенса о разложении ускорения точки на тангенциальное и нормальное . . . . .	5
<b>3 Криволинейные координаты точки. Коэффициенты Ламе. Скорость и ускорение точки в криволинейных координатах. Скорость точки в цилиндрических и сферических координатах</b>	<b>5</b>
3.1 Криволинейные координаты точки . . . . .	5
3.2 Коэффициенты Ламе . . . . .	5
3.3 Скорость и ускорение точки в криволинейных координатах . . . . .	5
3.4 Скорость точки в цилиндрических и сферических координатах . . . . .	6
<b>4 Угловая скорость и угловое ускорение твёрдого тела. Скорости и ускорения точек твёрдого тела в общем случае его движения (формулы Эйлера и Ривальса)</b>	<b>6</b>
4.1 Угловая скорость и угловое ускорение твёрдого тела . . . . .	6
4.2 Скорости и ускорения точек твёрдого тела в общем случае его движения (формулы Эйлера и Ривальса) . . . . .	6
<b>5 Плоское движение твёрдого тела. Мгновенный центр скоростей. Мгновенный центр ускорений</b>	<b>6</b>
5.1 Плоское движение твёрдого тела . . . . .	6
5.2 Мгновенный центр скоростей . . . . .	6
5.3 Мгновенный центр ускорений . . . . .	6
<b>6 Кинематические инварианты. Кинематический винт. Мгновенная винтовая ось</b>	<b>7</b>
6.1 Кинематические инварианты . . . . .	7
6.2 Кинематический винт . . . . .	7
6.3 Мгновенная винтовая ось . . . . .	7
<b>7 Алгебра кватернионов</b>	<b>7</b>
<b>8 Кватернионный способ задания ориентации твёрдого тела. Теорема Эйлера о конечном повороте</b>	<b>7</b>
8.1 Аффинные преобразования, их свойства . . . . .	7
8.2 Аффинная группа . . . . .	7
<b>Структура линейного преобразования</b>	<b>8</b>
<b>9 Инвариантные подпространства. Ограничение оператора на инвариантное подпространство. Фактороператор</b>	<b>8</b>
9.1 Инвариантные подпространства . . . . .	8
9.2 Ограничение оператора на инвариантное подпространство . . . . .	9
9.3 Фактороператор . . . . .	9
<b>10 Собственные векторы и собственные значения. Собственные подпространства. Характеристический многочлен и его инвариантность. Определитель и след преобразования</b>	<b>9</b>
10.1 Собственные векторы и собственные значения . . . . .	9
10.2 Собственные подпространства . . . . .	9
10.3 Характеристический многочлен и его инвариантность . . . . .	9

10.4	Определитель и след преобразования . . . . .	10
11	<b>Линейная независимость собственных подпространств, отвечающих различным собственным значениям. Алгебраическая и геометрическая кратность собственного значения. Критерий диагонализированности преобразования</b>	10
11.1	Линейная независимость собственных подпространств, отвечающих различным собственным значениям . . . . .	10
11.2	Алгебраическая и геометрическая кратность собственного значения . . . . .	10
11.3	Критерий диагонализированности преобразования . . . . .	11
12	<b>Инвариантные подпространства малой размерности в вещественном случае</b>	11
13	<b>Треугольный вид матрицы преобразования. Теорема Гамильтона-Кэли</b>	11
13.1	Треугольный вид матрицы преобразования . . . . .	11
13.2	Теорема Гамильтона-Кэли . . . . .	12
14	<b>Корневые подпространства, их размерность. Разложение пространства в прямую сумму корневых. Жорданова нормальная форма, её существование и единственность. Минимальный многочлен, критерий диагонализированности оператора в терминах минимального многочлена</b>	12
14.1	Корневые подпространства, их размерность . . . . .	12
14.2	Разложение пространства в прямую сумму корневых . . . . .	12
14.3	Жорданова нормальная форма, её существование и единственность . . . . .	13
14.4	Минимальный многочлен, критерий диагонализированности оператора в терминах минимального многочлена . . . . .	14
	<b>Билинейные формы</b>	14
15	<b>Билинейные (полуторалинейные) формы (функции). Координатная запись билинейной формы. Матрица билинейной формы и её изменение при замене базиса</b>	14
15.1	Билинейные (полуторалинейные) формы (функции) . . . . .	14
15.2	Координатная запись билинейной формы . . . . .	15
15.3	Матрица билинейной формы и её изменение при замене базиса . . . . .	15
16	<b>Симметричные билинейные (полуторалинейные) формы. Взаимно-однозначное соответствие с квадратичными (эрмитовыми) формами</b>	15
16.1	Симметричные билинейные (полуторалинейные) формы . . . . .	15
16.2	Взаимно-однозначное соответствие с квадратичными (эрмитовыми) формами . . . . .	15
17	<b>Ядро билинейной функции. Ортогональное дополнение подпространства. Ограничение билинейной функции на подпространство. Критерий невырожденности подпространства. Существование нормального вида билинейной симметричной формы над полями <math>\mathbb{R}</math> и <math>\mathbb{C}</math></b>	15
17.1	Ядро билинейной функции . . . . .	15
18	<b>Алгоритмы приведения квадратичной формы к нормальному виду (метод Лагранжа и сведенных элементарных преобразований матрицы)</b>	15
19	<b>Закон инерции квадратичной (эрмитовой) формы. Положительный и отрицательный индексы инерции, их геометрическая характеристика. Критерий Сильвестра</b>	16
19.1	Закон инерции квадратичной (эрмитовой) формы . . . . .	16
19.2	Критерий Сильвестра . . . . .	16
20	<b>Кососимметричные билинейные функции, приведение их к нормальному виду</b>	17
	<b>Пространства со скалярным произведением</b>	17
21	<b>Евклидовы и унитарные пространства. Матрица Грама и её свойства. Неравенство Коши – Буняковского – Шварца, неравенство треугольника. Метрика. Выражение скалярного произведения в координатах</b>	17
21.1	Евклидовы и унитарные пространства . . . . .	17
21.2	Матрица Грама и её свойства . . . . .	17
21.3	Неравенство Коши – Буняковского – Шварца, неравенство треугольника . . . . .	17

21.4	Метрика . . . . .	18
21.5	Выражение скалярного произведения в координатах . . . . .	18
<b>22</b>	<b>Ортогональные системы векторов и подпространств. Существование ортонормированных базисов (ОНБ). Изоморфизм евклидовых пространств. Ортогональные и унитарные матрицы. Переход от ОНБ к ОНБ</b>	<b>18</b>
22.1	Ортогональные системы векторов и подпространств . . . . .	18
22.2	Существование ортонормированных базисов (ОНБ) . . . . .	18
22.3	Изоморфизм евклидовых пространств . . . . .	18
22.4	Ортогональные и унитарные матрицы . . . . .	18
22.5	Переход от ОНБ к ОНБ . . . . .	19
<b>23</b>	<b>Ортогональное дополнение подпространства. Ортогональная проекция. Алгоритм ортогонализации Грама-Шмидта</b>	<b>19</b>
23.1	Ортогональное дополнение подпространства . . . . .	19
23.2	Ортогональная проекция . . . . .	19
23.3	Алгоритм ортогонализации Грама-Шмидта . . . . .	20
<b>24</b>	<b>Описание линейных функций на евклидовом (унитарном) пространстве</b>	<b>20</b>
<b>25</b>	<b>Преобразование, сопряжённое данному. Его линейность, существование и единственность, его матрица в ОНБ. Теорема Фредгольма</b>	<b>20</b>
25.1	Преобразование, сопряжённое данному . . . . .	20
25.2	Его линейность, существование и единственность, его матрица в ОНБ . . . . .	20
25.3	Теорема Фредгольма . . . . .	20
<b>26</b>	<b>Самосопряжённые линейные преобразования. Свойства самосопряжённых преобразований, существование ОНБ из собственных векторов</b>	<b>20</b>
26.1	Самосопряжённые линейные преобразования . . . . .	20
26.2	Свойства самосопряжённых преобразований, существование ОНБ из собственных векторов . . . . .	21
<b>27</b>	<b>Ортогональные и унитарные преобразования, их свойства. Канонический вид унитарного и ортогонального преобразования. Нормальные преобразования унитарных пространств</b>	<b>21</b>
27.1	Ортогональные и унитарные преобразования, их свойства . . . . .	21
27.2	Канонический вид унитарного и ортогонального преобразования . . . . .	21
<b>28</b>	<b>Полярное разложение линейного преобразования в евклидовом пространстве, его существование</b>	<b>22</b>
<b>29</b>	<b>Квадратичные (эрмитовы) формы в евклидовых (унитарных) пространствах. Присоединенный оператор. Существование ОНБ, в котором квадратичная (эрмитова) форма имеет диагональный вид. Применение к классификации кривых второго порядка. Одновременное приведение пары квадратичных форм к диагональному виду</b>	<b>22</b>
29.1	Квадратичные (эрмитовы) формы в евклидовых (унитарных) пространствах . . . . .	22
29.2	Существование ОНБ, в котором квадратичная (эрмитова) форма имеет диагональный вид . . . . .	22
29.3	Применение к классификации кривых второго порядка . . . . .	22
29.4	Одновременное приведение пары квадратичных форм к диагональному виду . . . . .	23
	<b>Сопряжённое пространство</b>	<b>23</b>
<b>30</b>	<b>Линейные функции. Сопряжённое пространство, его размерность. Биортогональный базис. Замена биортогональных базисов. Канонический изоморфизм пространства и дважды сопряжённого к нему</b>	<b>23</b>
30.1	Линейные функции . . . . .	23
30.2	Сопряжённое пространство, его размерность . . . . .	23
30.3	Биортогональный базис . . . . .	23
30.4	Замена биортогональных базисов . . . . .	23
30.5	Канонический изоморфизм пространства и дважды сопряжённого к нему . . . . .	23

<b>31 Аннулятор подпространства, соответствие между подпространствами <math>V</math> и <math>V^*</math>. Сопряжённое преобразование, его свойства</b>	<b>24</b>
31.1 Аннулятор подпространства, соответствие между подпространствами $V$ и $V^*$ . . . . .	24
31.2 Сопряжённое преобразование, его свойства . . . . .	24
<b>Тензоры</b>	<b>24</b>
<b>32 Полилинейные отображения. Определение тензора типа <math>(p,q)</math> на линейном пространстве <math>V</math>. Пространство <math>T_q^p(V)</math> тензоров типа <math>(p,q)</math>. Тензорный базис в <math>T_q^p(V)</math>. Изменение компонент тензора при замене базиса</b>	<b>25</b>
32.1 Полилинейные отображения . . . . .	25

# 1 Кинематика точки. Траектория, скорость и ускорение точки. Скорость и ускорение точки в полярных координатах

## 1.1 Кинематика точки

**Опр** Кинематика точки. Траектория, скорость и ускорение точки

Раздел механики, изучающий математическое описание (средствами геометрии, алгебры, математического анализа...) движения материальной точки без рассмотрения причин движения (массы, сил и т. д.)

**Опр** Траектория

**Опр** Скорость

**Опр** Ускорение

## 1.2 Скорость и ускорение точки в полярных координатах

**Опр** Радиальная ось

**Опр** Трансверсальная ось

Для того чтобы получить скорость и ускорение в полярных координатах, достаточно выразить  $x$  и  $y$  в терминах  $r, \varphi$ , продифференцировать нужное число раз и вычленив базисные векторы

# 2 Кинематика точки. Естественный трёхгранник. Теорема Гюйгенса о разложении ускорения точки на тангенциальное и нормальное

## 2.1 Кинематика точки. Естественный трёхгранник

**Опр** Естественный способ задания движения

**Опр** Естественный трёхгранник

## 2.2 Теорема Гюйгенса о разложении ускорения точки на тангенциальное и нормальное

Запишем две формулы из дифференциальной геометрии и продифференцируем  $r$  и  $v$  с их учётом. Получим две компоненты ускорения: тангенциальное и нормальное

**Theorem** Гюйгенса о разложении ускорения

# 3 Криволинейные координаты точки. Коэффициенты Ламе. Скорость и ускорение точки в криволинейных координатах. Скорость точки в цилиндрических и сферических координатах

## 3.1 Криволинейные координаты точки

**Опр** Криволинейные координаты

**Опр** Первая координатная линия

**Опр** Первая координатная ось

Аналогично определяются и последующие координатные линии и оси

## 3.2 Коэффициенты Ламе

**Опр** Единичный вектор координатной оси

**Опр** Коэффициент Ламе

**Опр** Ортогональные криволинейные координаты

## 3.3 Скорость и ускорение точки в криволинейных координатах

Скорость находится по определению. Ускорение смотреть в конспекте Холостовой с 8 страницы

### 3.4 Скорость точки в цилиндрических и сферических координатах

**Опр** Цилиндрическая система координат

**Опр** Сферическая система координат

Скорость точки в этих координатах находится с помощью коэффициентов Ламе

## 4 Угловая скорость и угловое ускорение твёрдого тела. Скорости и ускорения точек твёрдого тела в общем случае его движения (формулы Эйлера и Ривальса)

### 4.1 Угловая скорость и угловое ускорение твёрдого тела

**Опр** Поступательно движущаяся и связанная системы координат

**Опр** Углы Эйлера

Углы, описывающие поворот абсолютно твердого тела в трёхмерном евклидовом пространстве

**Опр** Линия узлов

Пересечение координатных плоскостей начальной и конечной СК

**Опр** Угол прецессии, нутации, собственного вращения

Переход от одной системы координат к другой посредством вращений на углы, можно задать с помощью матриц поворота

Матрица поворота (или матрица направляющих косинусов)

**Опр** Ортогональная матрица, которая используется для выполнения собственного ортогонального преобразования в евклидовом пространстве. При умножении любого вектора на матрицу поворота длина вектора сохраняется. Определитель матрицы поворота равен единице

Матрицы поворота вокруг различных осей выглядят по-разному

**Опр** Угловая скорость

Физическая величина, характеризующая быстроту и направление вращения материальной точки или абсолютно твёрдого тела относительно оси

**Опр** Угловое ускорение

### 4.2 Скорости и ускорения точек твёрдого тела в общем случае его движения (формулы Эйлера и Ривальса)

**Theorem** Формула Эйлера

**Формула** Ривальса Получается формальным дифференцированием формулы Эйлера

## 5 Плоское движение твёрдого тела. Мгновенный центр скоростей. Мгновенный центр ускорений

### 5.1 Плоское движение твёрдого тела

**Опр** Плоское движение

### 5.2 Мгновенный центр скоростей

**Theorem** О мгновенном центре скоростей

**Опр** Мгновенный центр скоростей

### 5.3 Мгновенный центр ускорений

**Theorem** О мгновенном центре ускорений

**Опр** Мгновенный центр ускорений

Мгновенный центр ускорений можно построить за два шага

## 6 Кинематические инварианты. Кинематический винт. Мгновенная винтовая ось

### 6.1 Кинематические инварианты

Опр *Инвариант*

Величина, остающаяся неизменной при преобразованиях

Опр *Первый кинематический инвариант*

Опр *Второй кинематический инвариант*

Отсюда следует, что величины проекции скоростей двух точек поступательного движущегося тела на прямую, их соединяющуюся, равны

### 6.2 Кинематический винт

Опр *Кинематический винт*

Опр *Параметр винта*

### 6.3 Мгновенная винтовая ось

Если расписать итоговую скорость точки по координатам, то можно получить

Опр *Мгновенная винтовая ось*

Опр *Правый и левый винт*

## 7 Алгебра кватернионов

Опр *Кватернион, кватернионные единицы*

Свойства *Кватернионного сложения*

Опр *Скалярная и векторные части кватерниона*

Свойства *Кватернионного умножения единиц*

Свойства *Кватернионного умножения*

Опр *Сопряжённый кватернион*

Опр *Норма кватерниона, нормированный кватернион*

Опр *Обратный кватернион*

Форма *Тригонометрическая записи кватерниона*

Результат умножения кватернионов в таком случае получается из свойств тригонометрии

Аналог *Формулы Муавра*

## 8 Кватернионный способ задания ориентации твёрдого тела. Теорема Эйлера о конечном повороте

### 8.1 Кватернионный способ задания ориентации твёрдого тела

Опр *Неподвижный и связанный базисы*

Theorem

### 8.2 Теорема Эйлера о конечном повороте

Theorem *Эйлера о конечном повороте*

Если воспользоваться предыдущей теоремой, то видно, что при повороте положение  $e$  сохраняется, а  $j$  поворачивается

## 9 Инвариантные подпространства. Ограничение оператора на инвариантное подпространство. Фактороператор

### 9.1 Инвариантные подпространства

Опр *Инвариантное подпространство* Образ лежит в нём же

Утв *Сумма и пересечение инвариантных подпространств инвариантно*

Доказывается поэлементной проверкой определения

**Утв** В случае коммутирующих преобразований ядро и образ одного инвариантно относительно другого  
Доказывается по определению

**Следствие** Ядро и образ многочлена  $f(\varphi)$  инвариантны относительно  $\varphi \in L(V, V)$

**Утв**  $U$  инвариантно относительно  $\varphi \Leftrightarrow U$  инвариантно относительно  $\varphi - \lambda, \lambda \in \mathbb{F}$

Доказывается проверкой в одну сторону и путём взятия другой  $\lambda$  в обратную

Таким образом, в случае  $\text{Im}(\varphi - \lambda) \subset U \Rightarrow U$  инвариантно  $\varphi$

## 9.2 Ограничение оператора на инвариантное подпространство

**Утв** Если  $U$  инвариантно относительно  $\varphi$  – изоморфизма, то  $U$  инвариантно относительно  $\varphi^{-1}$

Достаточно рассмотреть сужение  $\varphi$  на  $U$ . В силу инъективности это будет изоморфизм. Тогда обращаем его и получаем требуемое

**Утв** Если  $U_k$  инвариантно относительно линейной оболочки первых  $k$  векторов  $\Leftrightarrow a_{ij} = 0, i \in \overline{k+1, n}, j \in \overline{1, k}$ , то есть матрица имеет блочно-диагональный вид, где второй квадрант есть сужение  $\varphi$  на  $U_k$

Достаточно воспользоваться определением матрицы линейного преобразования и вспомнить, что у нас базис не меняется

**Утв** Если  $\varphi \in L(V, V)$ , а  $P(\varphi), \deg P = k$  вырожден, то существует не более чем  $k$ -мерное инвариантное подпространство  $V$  относительно  $\varphi$

1. Возьмём произвольный элемент ядра  $a$  и покажем, что  $U = \langle a, \varphi(a), \dots, \varphi^{k-1}(a) \rangle$  инвариантно относительно  $\varphi$
2. В силу индуктивности  $\varphi^j$ , достаточно доказать лишь что  $\varphi^k(a) \in U$
3. Подставляем  $\varphi(a)$  в многочлен и получаем, что  $\varphi^k(a)$  линейно выражается через остальные члены, что доказывает инвариантность и утверждение

## 9.3 Фактороператор

**Опр** Фактороператор Линейный оператор, определённый формулой  $(v + U) = \varphi(v) + U, \forall v \in V$

# 10 Собственные векторы и собственные значения. Собственные подпространства. Характеристический многочлен и его инвариантность. Определитель и след преобразования

## 10.1 Собственные векторы и собственные значения

**Опр** Собственное значение Существует  $a \in V$  :

**Опр** Собственный вектор Ненулевой вектор  $a$  преобразования ...

**Утв** Ненулевой вектор  $a$  собственный для  $\varphi \Leftrightarrow \langle a \rangle$  инвариантна относительно  $\varphi$

В силу эквивалентности инвариантности наличию собственного значения

**Утв** Ненулевой вектор  $a$  собственный для  $\varphi$  с собственным значением  $\lambda \Leftrightarrow a \in \ker(\varphi - \lambda)$

Достаточно вспомнить определение ядра

## 10.2 Собственные подпространства

**Опр** Собственное подпространство Ядро  $\ker(\varphi - \lambda)$ , содержащее ...

**Утв** Сумма подпространств  $V_{\lambda_i}$  прямая

1. От противного: возьмём  $a_1 \in V_{\lambda_1} \cap \sum_2^n V_{\lambda_i}$ , то есть  $a_1 = \sum_2^n a_i$
2. Применим к этому равенству преобразование  $\Pi_2^k(\varphi - \lambda_k)$
3. Справа у нас получится ноль, а слева – нет,  $w$



### 10.3 Характеристический многочлен и его инвариантность

**Опр** *Характеристический многочлен* Функция от константы. Не забыть про обозначение

**Опр** *Характеристическое уравнение* Равенства многочлена нулю

**Опр** *Характеристические числа* Корни характеристического многочлена

Характеристический многочлен можно записать и с учётом алгебраической кратности его корней

**Утв** *Характеристический многочлен имеет вид  $(-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} \text{tr} A + \dots + |A|$*

Достаточно знать, что определитель есть функция от всех элементов матрицы, затем просто расписать коэффициенты перед требуемыми степенями

Отсюда, в соответствии с теоремой Виета, сумма всех характеристических чисел равна следу, а произведение есть  $\det A$

Стоит учесть, что данное утверждения верно лишь в  $\mathbb{C}$ . В  $\mathbb{R}$  собственные значения есть только вещественные характеристические числа

### 10.4 Определитель и след преобразования

**Утв** *Если матрица оператора верхнетреугольна, то характеристические числа совпадают с диагональными элементами*

Верно в силу того, что определитель верхнетреугольной матрицы равен произведению диагональных элементов

**Th** *Инвариантность характеристического многочлена*

*Характеристический многочлен не зависит от выбора базиса*

Достаточно записать характеристическое уравнение в двух базисах, перейти от одного к другому с помощью матрицы перехода и преобразовать выражение

**Следствие** *Определитель, след, набор характеристических чисел матрицы оператора не зависят от выбора базиса*

Все вышеперечисленные термины выражаются через коэффициенты характеристического многочлена

## 11 Линейная независимость собственных подпространств, отвечающих различным собственным значениям. Алгебраическая и геометрическая кратность собственного значения. Критерий диагонализированности преобразования

### 11.1 Линейная независимость собственных подпространств, отвечающих различным собственным значениям

**Th**  $\lambda$  – собственное значение  $\Leftrightarrow \lambda$  характеристическое число

1.  $\lambda$  – собственное значение  $\Leftrightarrow \ker(\varphi - \lambda) \neq O$
2.  $\Leftrightarrow$  соответствующая СЛУ имеет нетривиальное решение
3.  $\Leftrightarrow$  соответствующая квадратная матрица вырождена
4.  $\Leftrightarrow$  соответствующий определитель равен нулю
5.  $\Leftrightarrow \lambda$  характеристическое число

**Th** *Собственные векторы различных собственных значений л.н.з.*

1. Доказывается по индукции. База очевидна
2. Докажем переход. Для этого рассмотрим  $k + 1$  собственный вектор, из которых  $k$  заведомо л.н.з
3. Применим к их л.к.  $\varphi$ . Из неё вычтем правильную л.к. первых  $k$  векторов (чтобы обнулить  $\alpha_{k+1}$ )
4. Итого,  $k$  коэффициентов нули, а значит, и  $k + 1$  тоже, то есть система осталась л.н.з.

## 11.2 Алгебраическая и геометрическая кратность собственного значения

**Опр** Геометрическая кратность Размерность собственного подпространства

**Th** Геометрическая кратность не превосходит алгебраическую

1. Рассмотрим собственное пространство размерности  $s$  и произвольный базис в нём. Дополним его до базиса во всём пространстве
2. Запишем матрицу линейного оператора. Она будет иметь блочно-диагональный вид
3. Вычислим характеристический многочлен матрицы и непосредственно убедимся в доказываемом (потому как в оставшемся многочлене собственное значение может быть корнем; в противном случае достигается равенство)

## 11.3 Критерий диагонализированности преобразования

**Опр** Диагонализированное преобразование Существует базис, в котором достигается диагональный вид

**Th** Первый критерий диагонализированности

Если  $\varphi \in L(V, V)$  имеет попарно различные собственные значения  $\lambda_i$  кратностей  $s_i$ , то следующие условия эквивалентны:

1.  $\varphi$  диагонализирован
  2. В пространстве существует базис из собственных векторов
  3.  $\dim V_{\lambda_i} = s_i$
  4.  $V = \bigoplus_i V_{\lambda_i}$
- $1 \Leftrightarrow 2$  : в силу того, что матрица  $A$  есть склейка применения  $\varphi$  на базисные векторы
  - $2 \Rightarrow 3$  : суммируем  $t_i \leq \dim V_{\lambda_i} \leq s_i$  по  $i$
  - $3 \Rightarrow 4$  : так как собственные пространства разных собственных значений не пересекаются, то они разлагаются в прямую сумму. Сумма их размерностей будет  $\sum_i s_i = n$ , то есть всего пространства
  - $4 \Rightarrow 2$  : достаточно выбрать базис в каждом подпространстве и объединить. Ранее доказывалось, что он будет базисом во всём пространстве (второй критерий прямой суммы)

**Следствие** Достаточное условие диагонализированности

Если характеристический многочлен имеет  $n$  различных корней из поля, то  $\varphi$  диагонализирован

Действительно, в таком случае у каждого собственного подпространства размерность единица и они располагаются на главной диагонали

## 12 Инвариантные подпространства малой размерности в вещественном случае

**Th**

1. В  $\mathbb{C}$  у  $\varphi \exists$  одномерное инвариантное подпространство
  2. В  $\mathbb{R}$  у  $\varphi \exists$  одномерное инвариантное подпространство в случае нечётного  $n$
  3. У  $\varphi \exists$  ненулевое инвариантное подпространство размерности не выше 2
1. По основной теореме алгебры у любого многочлена есть по крайней мере один комплексный корень
  2. Из анализа известно, что в таком случае у многочлена есть по крайней мере один вещественный корень
  3. Если у многочлена есть вещественный корень, то у него есть и одномерное инвариантное подпространство. Иначе рассмотрим комплексный корень. Из анализа известно, что его сопряжённый тоже будет корнем характеристического многочлена. Тогда многочлен  $P$  с этими коэффициентами будет вещественен, а  $\det P(A) = 0$  в силу наличия соответствующих собственных значений, то есть наш многочлен вырожден. В таком случае ранее было доказано, что у  $\varphi \exists$  двумерное (на самом деле,  $\leq 2$ ) инвариантное подпространство

## 13 Треугольный вид матрицы преобразования. Теорема Гамильтона-Кэли

### 13.1 Треугольный вид матрицы преобразования

**Лемма**  $\exists (n-1)$ -мерное инвариантное подпространство

1. Возьмём произвольное  $\lambda_0$  и сделаем выводы по размерности ядра и образа для  $\varphi - \lambda_0$
2. Выясним существования  $U : \dim U = n-1$  — не более чем надмножество  $\text{Im } \varphi - \lambda_0$ . Для его построения возьмём базис в образе и дополним его до базиса во всём  $V$
3. В конце возьмём базис для  $U$  (первые  $n-1$  вектор), задаваемый требуемое подпространство

**Лемма** *О треугольном виде*

$\exists$  базис, в котором матрица  $\varphi \in L(V, V)$  верхнетреугольна с заданным порядком расстановки характеристических чисел по диагонали

1. Возьмём произвольные  $\lambda_0$  и инвариантное  $n-1$  подпространство
2. Далее получим вид для  $\varphi : \varphi = \lambda_0 e_n + \sum_{i=1}^{n-1} \mu_i f_i$
3. Сделаем вывод о матрице оператора, характеристическом многочлене сужения
4. Затем применяем спуск индукции, чтобы поместить на главную диагональ нужные базисные векторы

### 13.2 Теорема Гамильтона-Кэли

**Th** *Гамильтона-Кэли*

**Характеристический многочлен** является аннулирующим для матрицы оператора

Это следует из того, что  $s_i \geq m_i$ , то есть характеристический многочлен содержит в себе минимальный (то есть аннулирующий)

## 14 Корневые подпространства, их размерность. Разложение пространства в прямую сумму корневых. Жорданова нормальная форма, её существование и единственность. Минимальный многочлен, критерий диагонализированности оператора в терминах минимального многочлена

### 14.1 Корневые подпространства, их размерность

**Опр** *Корневое подпространство* Первое стабильное ядро

Притом корневое пространство равно и все стабильным ядрам большей размерности

**Лемма**  $\dim \ker(\varphi - \lambda_i)^{s_i} \geq s_i$

1. Запишем матрицу в верхнетреугольном виде, притом расположим  $\lambda_i$  в первых  $s_i$  диагональных клетках
2. Применим к матрице преобразование  $\varphi - \lambda_i$ . Получим нильпотентный левый верхний блок
3. Возведём матрицу в нужную степень с учётом перемножения блочных матриц и получим левый верхний блок нулей
4. Тогда получим, что первые  $s_i$  векторов принадлежат соответствующему ядру. А так как такими же могут быть и последующие векторы, то возможно строгое неравенство

**Следствие**  $\dim V^{\lambda_i} \geq s_i$

## 14.2 Разложение пространства в прямую сумму корневых

**Лемма** Сумма любых степеней ядер  $\varphi - \lambda_i$  прямая

1. От противного: пусть  $\exists a_1 = V^{\lambda_1} \cap \sum_2^k V^{\lambda_i}$
2. Тогда этот вектор можно разложить по этим подпространствам
3. Применим к обеим частям равенства  $\psi = \prod_2^k (\varphi - \lambda_i)$
4. Тогда справа получим ноль, а слева – нет,  $w$

В частности, сумма корневых пространств прямая

**Th**

1.  $V = \oplus_i V^{\lambda_i}$
2.  $\dim V_i^\lambda = s_i$
3.  $m_i \leq s_i$ , то есть стабилизация ядер наступает не позже  $s_i$  шага
1. В силу  $\dim V_i^\lambda \geq s_i$  сложим неравенства по всем  $i$ . Тогда  $\sum_i s_i \geq n$ , однако у нас  $\dim V = n$ , поэтому  $V = \oplus_i V^{\lambda_i}$
2. Предыдущий пункт возможен лишь когда во всех неравенствах выполнено равенство
3.  $\dim \ker(\varphi - \lambda_i)^{s_i} \geq s_i = \dim V_i^\lambda$ , однако  $\ker(\varphi - \lambda_i) \subset V_i^\lambda$ . В противном случае не выполнена формула суммы размерностей ядра и образа

## 14.3 Жорданова нормальная форма, её существование и единственность

**Опр Жорданова клетка** Верхнетреугольная матрица, в которой на главной диагонали ...

**Опр Жорданова матрица, ЖНФ** Блочно-диагональная матрица, каждый блок которой ...

**Опр Жорданов базис** Базис, в котором оператор имеет ЖНФ

**Опр Жорданова цепочка, присоединённый вектор**

1. Рассмотрим жорданову клетку запишем её действие в строчном виде
2. Рассмотрим новый оператор  $\psi = \varphi - \lambda_0$ . Под его действием векторы сваливаются в ядра меньшего по степени оператора
3. Полученная последовательность называется жордановой цепочкой
4. Вектор над данным называется присоединённым. Ясно, что он может быть и не единственен

**Th Существование ЖНФ**

Существует базис, в котором матрица оператора жорданова

1. Требуется доказать, что существует базис, являющийся объединением жордановых цепочек, то есть так надо сделать в каждом корневом подпространстве
2. Рассмотрим нильпотентный оператор  $\psi : V_i^\lambda \rightarrow V_i^\lambda$ , являющийся ограничением оператора  $\varphi - \lambda_i$  на  $V_i^\lambda$
3. Заметим, что если  $a \in \ker \psi^t$ , то  $a \in \ker \psi^{t-1}$  (непосредственно проверяется)
4. Теперь рассмотрим вложенную цепочку ядер и определим к последнему,  $V_i^\lambda$  прямое (нулевое дополнение)  $W_{m_i+1}$  до следующего ядра (которое будет являться самим  $V_i^\lambda$ )
5. Рассмотрим ядро  $\psi(W_{t+1})$ , для которого выполнено три условия
6. Из них мы можем определить  $W_t$  как прямое дополнение  $\ker \psi^{t-1}$  до  $\ker \psi^t$  (дополним до базиса)
7. Таким образом, применяя оператор  $\psi(W_{t+1})$  мы спускаемся вниз по цепочке и, дополнив до базиса, продолжаем спуск
8. Жорданов базис есть объединение базисов  $W_i$  каждое из которых лежит в  $\ker \psi^i$ , то есть базисных разных  $W_i$  пересекаются тривиально (к том же мы пользовались л.н.з. дополнением)

**Th Единственность ЖНФ**

Для данного базиса ЖНФ единственна с точностью до перестановки жордановых клеток

1. Требуется доказать, что  $\forall \lambda_i$  количество жордановых цепочек данной длины в жордановом базисе определено однозначно
2. Рассмотрим все цепочки, соответствующие фиксированному  $\lambda_i$ . Их линейная оболочка находится  $\in V_i^\lambda$ ,  $\dim < B_{\lambda_i} > \leq s_i$
3. Так как всего в (жордановом) базисе у нас  $n$  векторов, а  $< B_{\lambda_i} >$  и составляют этот базис, то в неравенствах выше достигается равенство
4. Рассмотрим нильпотентный оператор  $\psi : V_i^\lambda \rightarrow V_i^\lambda$ , являющийся ограничением оператора  $\varphi - \lambda_i$  на  $V_i^\lambda$
5. Его образ состоит из всех не верхних векторов в цепочках, образ его образа состоит из всех векторов, кроме ...
6. Введём обозначения для количества жордановых цепочек длины  $d$ , отвечающих  $\lambda_i$  за  $c_i^d$
7. Составим уравнения на их суммы, чья система легко решается и однозначно выражается через характеристики оператора  $\varphi$ , то есть инвариантно

Из указанного рассмотрения нетрудно заметить, что степень  $\lambda - \lambda_i$  характеристического многочлена  $s_i$  равна длине всех цепочек, отвечающих  $\forall \lambda_i$ , а степень  $m_i$  минимального многочлена равна длине максимальной (иначе оператор обнулится не полностью, не по всем цепочкам-базисным векторам)

#### 14.4 Минимальный многочлен, критерий диагонализруемости оператора в терминах минимального многочлена

**Опр Минимальный многочлен** Многочлен, обнуляющий оператор, минимальной степени

**Утв Минимальный многочлен является аннулирующим**

1. Хотя бы один аннулирующий многочлен существует, ведь если взять степени оператора, которые будут больше размерности пространства, то эта система будет л.з., а значит, у соответствующего многочлена будут ненулевые коэффициенты
2. Теперь возьмём произвольный вектор  $a \in V = \oplus_i V^{\lambda_i}$
3. Так как ядра каждого одночлена содержатся в ядре минимального, то каждый член разложения из ядра минимального многочлена. Тогда и  $a$  тоже
4. Итого, в силу произвольности  $a$ , минимальный многочлен аннулирующий

**Утв Минимальный многочлен есть  $\prod_i (\lambda - \lambda_i)^{m_i}$**

1. От противного: пусть хотя бы одна степень тут меньше, то есть БОО  $m'_1 < m_1$
2. Тогда  $\dim \ker(\varphi - \lambda_1)^{m'_1} < s_1$  по лемме
3. Если мы сложим все ядра такого вида то получим строгое неравенство. То есть существуют вектор пространства  $a : \mu_\varphi(\varphi(a)) \neq 0$ , то есть новый многочлен не минимальный

**Th Второй критерий диагонализруемости**

Если  $\varphi \in L(V, V)$  имеет попарно различные собственные значения  $\lambda_i$  кратностей  $s_i$ , то следующие условия эквивалентны:

1.  $\varphi$  диагонализруем
  2.  $V_{\lambda_i} = V^{\lambda_i}$
  3.  $\mu_\varphi$  раскладывается на различные линейные множители
- $1 \Leftrightarrow 2$  : в силу того, что  $V_{\lambda_i} \subseteq V_i^\lambda$  и  $V = \oplus_i V_{\lambda_i}$ , достигается равенство множеств
  - $2 \Rightarrow 3$  : из 2 следует, что  $m_i = 1 \forall i$ , поэтому все  $n$  множителей различны

# Билинейные формы

## 15 Билинейные (полуторалинейные) формы (функции). Координатная запись билинейной формы. Матрица билинейной формы и её изменение при замене базиса

### 15.1 Билинейные (полуторалинейные) формы (функции)

**Опр** Билинейная форма, полуторалинейное отображение Не забыть сопрячь на втором аргументе

**Опр** Матрица билинейной формы Её элемент есть результат применения формы на пару базисных векторов

### 15.2 Координатная запись билинейной формы

**Th** Координатная запись

$$\beta(x, y) = x^T B \bar{y}$$

Достаточно представить векторы в координатной записи и раскрыть по билинейности

**Утв** Если произвольно отображения удовлетворяет равенству  $\beta(x, y) = x^T B \bar{y}$ , то это билинейная форма

Так как запись верна для всех векторов, то она верна и для базисных, к чему мы её и применим. Далее проверим аксиомы и убедимся, что перед нами билинейная форма

### 15.3 Матрица билинейной формы и её изменение при замене базиса

**Th** Изменение матрицы при замене базиса

$$\beta' = S^T B \bar{S}$$

Достаточно вставить матрицу перехода на нужные места

## 16 Симметричные билинейные (полуторалинейные) формы. Взаимно-однозначное соответствие с квадратичными (эрмитовыми) формами

### 16.1 Симметричные билинейные (полуторалинейные) формы

**Опр** (Эрмитова) симметричная форма  $\beta(x, y) = \overline{\beta(y, x)}$

**Th** Билинейная форма симметрична  $\Leftrightarrow B = B^*, B^* = \overline{B^T}$

$\Rightarrow$ : по определению билинейной формы  $\Leftarrow$ : надо воспользоваться тем, что результат билинейной формы есть число (матрица 1 на 1), а затем подогнать под определение, используя транспонирования и сопряжение

### 16.2 Взаимно-однозначное соответствие с квадратичными (эрмитовыми) формами

**Опр** Квадратичная (эрмитова) форма  $q(x) = \beta(x, x)$ , порождённая билинейной

Учтём, что теперь  $\beta(a, a) = \overline{\beta(a, a)}, q(a) = x^T B \bar{x}$

**Th** (Эрмитова) квадратичная форма порождается ровно одной билинейной  $\Leftrightarrow B = B^*, B^* = \overline{B^T}$

1. Требуется доказать, что значение билинейной формы однозначно восстанавливается по квадратичной
2. В  $\mathbb{R}$  достаточно рассмотреть  $q(x + y)$
3. В  $\mathbb{C}$  достаточно рассмотреть  $q(x + y)$  и  $iq(x + iy)$ , не забыв, где надо, про комплексное сопряжение и что  $i^2 = -1$

## 17 Ядро билинейной функции. Ортогональное дополнение подпространства. Ограничение билинейной функции на подпространство. Критерий невырожденности подпространства. Существование нормального вида билинейной симметричной формы над полями $\mathbb{R}$ и $\mathbb{C}$

### 17.1 Ядро билинейной функции

## 18 Алгоритмы приведения квадратичной формы к нормальному виду (метод Лагранжа и сдвоенных элементарных преобразований матрицы)

**Опр** *Диагональный вид формы* Матрица формы в данном базисе диагональна

**Опр** *Канонический диагональный вид формы* Каждый элемент диагонали  $\in \{-1; 0; 1\}$

Заметим, от диагонального вида легко перейти к каноническому (путём линейной замены)

**Th** *Существует базис, в котором квадратичная форма имеет диагональный вид*

- Допустим  $b_{11} \neq 0, b_{m1} \neq 0$ . Тогда применим сдвоенное элементарное преобразование: вычтем из  $m$ -й строки и столбца 1-ю строку и столбец, домноженные на соответствующий коэффициент ( $b_{1m} \neq \overline{b_{m1}}$ ). Далее продолжим с матрицей меньшей размерности
- Если хотя бы один диагональный элемент не ноль, то поменяем местами базисные векторы и продолжим как в простом случае
- Если все диагональные элементы ноль, то прибавим к нему столбец и строку с ненулевым элементом  $\lambda$  той же линии (получится в результате сдвоенности  $2\lambda$ ). Затем продолжим как в простом случае

## 19 Закон инерции квадратичной (эрмитовой) формы. Положительный и отрицательный индексы инерции, их геометрическая характеристика. Критерий Сильвестра

### 19.1 Закон инерции квадратичной (эрмитовой) формы

**Опр** *Положительно (полу)определённая форма* Положительна (неотрицательна) на ...

**Опр** *Отрицательно (полу)определённая форма* Аналогично

**Th** *Квадратичная форма определена положительно  $\Leftrightarrow d_i > 0 \forall i$*

$\Rightarrow: d_i = q(e_i)$  по определению положительной определённости  $\Leftarrow$ : в силу  $q(a) = \sum_i d_i |x_i|^2$

Отсюда следует, что определитель матрицы положительно определённой формы положителен

Аналогичные критерии есть и у отрицательно- и полуопределённых форм

**Опр** *Положительный индекс инерции* Наибольшее число, для которого  $\exists U \dots$

**Th** *Об индексах инерции*

*Индексы инерции  $p, q$  равны количеству соответствующих по знаку чисел среди  $d_i$*

1. Докажем для положительного индекса инерции
2. БОО положительные можно считать  $p'$  – количество положительных  $d_i$  – элементов первыми. Тогда ограничение на этом подпространстве и будет отвечать определению положительного индекса инерции
3. Пусть  $p > p'$ . Тогда рассмотрим подпространство соответствующей размерности
4. По формуле включений-исключений придём к тому, что пересечение пространства и отрицательно полуопределённого подпространства ненулевое. Тогда существует ненулевой вектор, на котором форма не определена однозначно,  $w$

**Следствие** *Ранг квадратичной формы равен  $p + q$*

**Опр** *Сигнатура квадратичной формы  $(p, q, n - p - q)$*

## 19.2 Критерий Сильвестра

**Th Критерий Сильвестра**

Квадратичная форма определена положительно  $\Leftrightarrow M_i > 0 \forall i$

1.  $\Rightarrow$ : достаточно рассмотреть сужение на каждое подпространство и вспомнить про следствие из закона инерции
2.  $\Leftarrow$ : от противного. Положим  $m$  – минимальное число первых базисных векторов элементов, на которых форма определена не положительно и рассмотрим сужение на них
3. Тогда из  $p \geq m - 1$  (в силу сужения на  $m - 1$  подпространстве) и  $p < m$ , иначе  $m$  определено неверно. Получаем равенство  $p = m - 1$
4. Перейдём к диагональному виду и рассмотрим определитель сужения на  $m$ -ное пространство. Он будет неположителен,  $w$

## 20 Кососимметричные билинейные функции, приведение их к нормальному виду

**Опр Кососимметрическая билинейная функция**  $\beta(x, y) = -\overline{\beta(y, x)}$

Из определения видно, что  $\beta(x, x) = 0$

**Th Билинейная форма кососимметрическая**  $\Leftrightarrow \overline{B^T} = -B$

$\Rightarrow$ : по определению кососимметрической формы  $\Leftarrow$ : надо воспользоваться тем, что результат билинейной формы есть число (матрица 1 на 1), а затем подогнать под определение, используя транспонирования и сопряжение

**Следствие Билинейная форма в нечётномерном векторном пространстве вырождена** Потому как тождественна  $O$

**Th Канонический вид**

Существует базис, в котором квадратичная форма имеет диагональный вид

- Допустим  $b_{11} = 0$  и соответствующие строка и столбец нулевые, то спускаем по размерности вниз
- Если хотя бы один не первый элемент строки не ноль, то поменяем местами вторую и эту строки. Затем путём элементарных преобразований сделаем  $+1$  (на столбце получим схожую картину) и спустимся вниз
- Если и после первого есть ненулевой элемент, то его можно сдвоенными ЭПС сделать нулевым

## Пространства со скалярным произведением

### 21 Евклидовы и унитарные пространства. Матрица Грама и её свойства. Неравенство Коши – Буняковского – Шварца, неравенство треугольника. Метрика. Выражение скалярного произведения в координатах

#### 21.1 Евклидовы и унитарные пространства

**Опр Евклидово (унитарное) пространство** Пространство над полем с фиксированным скалярным произведением

**Опр Норма (длина) вектора**  $|x| = \sqrt{\beta(x, x)}$

Норма неотрицательна и нулевая в случае нулевого вектора

**Опр Ортогональные векторы**  $\beta(x, y) = 0$



## 21.2 Матрица Грама и её свойства

**Опр Матрица Грама** Матрица системы векторов:  $g_{ij} = (a_i, a_j)$

**Утв** Определитель матрицы Грама положителен при л.н.з системе и ноль иначе

1. На л.н.з. векторах матрица Грама есть матрица п.о. билинейной симметрической формы, поэтому её детерминант положителен.
2. В случае л.з. системы составим её нетривиальную л.к., домножим на векторы  $a_j$  и повторим так  $\forall j \in \overline{1, n}$
3. Тогда если составить из строчек матричное уравнение, то получим  $Gx = 0$ , что в силу  $x \neq 0$  означает вырожденность  $G$

## 21.3 Неравенство Коши – Буняковского – Шварца, неравенство треугольника

**Следствие Неравенство Коши – Буняковского – Шварца**

$$\forall a, b \in E |a||b| \geq |(a, b)|$$

Достаточно воспользоваться предыдущей теоремой и раскрыть определитель, сняв в конце квадраты

**Следствие Неравенство треугольника**

$$\forall a, b \in E |a||b| \geq |a + b|$$

Достаточно расписать  $|a + b|^2$  и воспользоваться предыдущим неравенством

## 21.4 Метрика

На  $E$  введём метрику как  $\rho(a, b) = |b - a|$ . Заметим, что в таком случае выполняются все 4 аксиомы метрики (неотрицательность, ноль при нуле, симметричность и неравенство треугольника)

## 21.5 Выражение скалярного произведения в координатах

**Опр Скалярное произведение** Билинейная (эрмитова) симметричная положительно ...

**Th Скалярное произведение**

$$(a, b) = x^T G \bar{y}$$

Это верно, потому как в случае базисных векторов матрица Грама совпадает с матрицей билинейной формы скалярного произведения

## 22 Ортогональные системы векторов и подпространств. Существование ортонормированных базисов (ОНБ). Изоморфизм евклидовых пространств. Ортогональные и унитарные матрицы. Переход от ОНБ к ОНБ

### 22.1 Ортогональные системы векторов и подпространств

**Опр Ортогональная, ортонормированная система** Векторы системе попарно ...

**Утв Теорема Пифагора**

$$|a_1 + \dots + a_n|^2 = |a_1|^2 + \dots + |a_n|^2$$

Раскрываем по линейности и ортогональности

**Утв Система ортогональная  $\Leftrightarrow$  матрица Грама ортогональная**

Следует из определения матрицы Грама. Аналогично в ортонормированном случае матрица Грама единичная

**Следствие 1 Ортогональная система ненулевых векторов л.н.з.**

Потому как соответствующая матрица Грама невырождена

**Следствие 2 При ортогональном базисе матрица формы скалярного произведения имеет диагональный вид, а при ОНБ – канонический**

### 22.2 Существование ортонормированных базисов (ОНБ)

**Следствие 3 В конечномерном евклидовом пространстве существует ОНБ**

Потому как существуют ортогональные системы. Если мы их запишем в виде матрицы формы, то, так как мы их умеем приводить к каноническому виду, мы получим ОНБ

## 22.3 Изоморфизм евклидовых пространств

**Опр** *Изоморфизм евклидовых пространств* Изоморфизм линейных пространств и ...

**Утв** *Отображение изоморфно  $\Leftrightarrow$  оно переводит ОНБ в ОНБ*

$\Rightarrow$ : в силу сохранения скалярного произведения и соразмерности пространств (следствие изоморфности)  $\Leftarrow$ : отображение переводит базис в базис, поэтому перед нами обычный изоморфизм линейных пространств. Применим отображение на двух произвольных векторах пространства. И получим, что сохраняется скалярное произведение, то есть перед нами изоморфизм линейных пространств по определению

**Th** *Два конечномерных евклидова пространства изоморфны  $\Leftrightarrow$  они соразмерны*

$\Rightarrow$ : в силу свойств изоморфизма линейных пространств  $\Leftarrow$ : приведём базисных обеих пространств к ОНБ и построим отображение, переводящее базис в базис. По предыдущему утверждению, перед нами изоморфизм

## 22.4 Ортогональные и унитарные матрицы

**Опр** *Ортогональная, унитарная матрицы* Над разными полями, множества пересекаются

**Утв** *Матрицы  $Q, R$  унитарны  $\Rightarrow$  матрицы  $Q^T, \bar{Q}, Q^*, QR, Q^{-1}$  унитарны*

Непосредственно проверяется определение

**Утв** *Детерминант унитарной матрицы единичен*

Для доказательства достаточно расписать определитель в определении и воспользоваться свойствами определителя

**Утв** *Для комплекснозначных матриц  $Q$  следующие условия эквивалентны*

1.  $Q$  унитарна
2.  $\exists Q^{-1}, Q^{-1} = Q^*$
3. Столбцы  $Q$  образуют ОНБ в унитарном пространстве столбцов

- $1 \Leftrightarrow 2$  : по определению
- $1 \Leftrightarrow 3$  : в силу определения унитарной матрицы возьмём скалярное произведение и получим, что каждый элемент результата есть  $\delta_{ij}$ , то есть перед нами ОНБ
- Столбцы  $Q$  образуют ОНБ в унитарном пространстве столбцов

## 22.5 Переход от ОНБ к ОНБ

**Следствие** *Переход от ОНБ к ОНБ*

**Базисы ОНБ  $\Leftrightarrow$  матрица перехода между ними ортогональная (унитарная)**

$\Rightarrow$ : потому что произведение матриц единично  $\Leftrightarrow$  матрицы единичны  $\Leftarrow$ : по определению матрицы перехода

## 23 Ортогональное дополнение подпространства. Ортогональная проекция. Алгоритм ортогонализации Грама-Шмидта

### 23.1 Ортогональное дополнение подпространства

**Опр** *Ортогональное дополнение* Множество всех векторов, ортогональных ...

Пространство образует со своим ортогональным дополнением прямую сумму

**Th** *Сумма подпространства и его ортогонального дополнения есть всё евклидово пространство*

1. Достаточно научиться представлять любой вектор пространства в виде суммы  $U$  и  $U^\perp$
2. Выберем ортогональный базис в  $U$  и запишем его линейную комбинацию + вектор  $c \in U^\perp$
3. Теперь надо подобрать такие коэффициенты, чтобы  $c \perp U$
4. Заменим условие на эквивалентные, вспомним про ортонормированность базиса и выразим коэффициенты

**Следствие 1**  $\dim U = k, \dim E = n \rightarrow \dim U^T = n - k$

**Следствие 2**  $(U^T)^T = U$

Потому как одно пространство вложено в другое и у них, по предыдущему следствию, равны размерности

**Следствие 2 В** конечномерном случае данную ортогональную систему из ненулевых векторов можно дополнить до ОНБ

Достаточно дополнить векторами из ортогонального дополнения

## 23.2 Ортогональная проекция

**Опр** Ортогональная проекция Проекция на подпространство вдоль (параллельно)  $U^T$

**Утв** Формула проекции

$$pr_U \bar{a} = \sum_i \frac{(a_i, b_i)}{(b_i, b_i)} b_i$$

Следствие последней теоремы

**Утв** Ортогональное дополнение в координатах

Ортогональное дополнение есть пространство решений уравнения  $(A_1, \dots, A_n)^* x = 0$

$x \in A^T \Leftrightarrow x \perp A \Leftrightarrow A_i \perp x \Leftrightarrow A_i^* x = 0$  и перейдём к матричной записи. Решение полученного уравнения и есть ортогональное дополнение

## 23.3 Алгоритм ортогонализации Грама-Шмидта

**Утв** Существует метод найти ортогональный базис в заданном подпространстве

- Рассмотрим линейную оболочку подпространства. Если  $a_1 = 0$ , то выкинем его из линейной оболочки
- Если  $a_1 \neq 0$ , то оставим его таким, какой он есть:  $b_1 = a_1$
- Если все  $a_k$  до текущего уже ортогонализированы, то  $b_{k+1} = a_{k+1} - pr_{\langle b_1, \dots, b_k \rangle} a_{k+1}$

При необходимости, полученную систему можно нормировать для получения ОНБ

## 24 Описание линейных функций на евклидовом (унитарном) пространстве

## 25 Преобразование, сопряжённое данному. Его линейность, существование и единственность, его матрица в ОНБ. Теорема Фредгольма

### 25.1 Преобразование, сопряжённое данному

**Опр** Сопряжённое преобразование  $\varphi^* : (\varphi(a), b) = (a, \varphi(b))$

### 25.2 Его линейность, существование и единственность, его матрица в ОНБ

**Утв**  $\psi = \varphi^* \Leftrightarrow B = A^*$

Достаточно расписать результат формы на паре векторов, определение сопряжённого преобразование и взглянуть на матрицы

**Следствие 1**  $\varphi^*$  единственно

Потому как у каждой матрицы есть единственная сопряжённо-транспонированная

**Следствие 1** Для сопряжённых преобразований справедливо 4 свойства

Первые три следуют из аналогичных свойств для матриц, а последнее из свойств комплексного сопряжения

**Th**  $U$  инвариантно относительно  $\varphi \Leftrightarrow U^\perp$  инвариантно относительно  $\varphi^*$

Достаточно вспомнить определения инвариантности, ортогонального дополнения и сопряжённого отображения

### 25.3 Теорема Фредгольма

Th Фредгольма  
 $\ker \varphi^* = (\operatorname{Im} \varphi)^\perp$

1. Докажем вложенность ядра в чужой образ и равенство размерностей. Это будет означать равенство
2. Равенство размерностей доказывается по прошлым утверждениям
3. Чтобы доказать вложенность рассмотрим произвольный вектор ядра, воспользуемся определениями ортогонального дополнения, образа и сопряжённого преобразования

## 26 Самосопряжённые линейные преобразования. Свойства самосопряжённых преобразований, существование ОНБ из собственных векторов

### 26.1 Самосопряжённые линейные преобразования

Опр Сопряжённое линейное преобразование  $\varphi^* = \varphi$   
 В таком случае  $(\varphi(a), b) = (a, \varphi(b))$

### 26.2 Свойства самосопряжённых преобразований, существование ОНБ из собственных векторов

Th  $\varphi$  самосопряжено  $\Leftrightarrow A = A^*$

Аналогично доказательству для сопряжённых преобразований

Th У самосопряжённого преобразования все характеристические числа действительны

В  $\mathbb{C}$  достаточно расписать определение самосопряжённого преобразования, собственного числа и прийти к равенству  $\lambda = \bar{\lambda}$ , что означает действительность

Так как в  $\mathbb{C}$  доказано, что характеристическое уравнение имеет лишь действительные корни. А симметрические вещественные матрицы являются частным случаем эрмитовых, поэтому теорема доказана и в  $\mathbb{R}$

Утв У самосопряжённого преобразования различные корневые подпространства перпендикулярны

Достаточно рассмотреть два вектора из разных корневых подпространств, расписать определение самосопряжённого преобразования, собственного числа и прийти к единственному случаю  $(a_i, a_j) = 0$

Th Основная теорема о самосопряжённых преобразованиях

Для самосопряжённого преобразования существует ОНБ из собственных векторов

1. Пусть  $\dim E = n$ . В случае  $n = 1$  очевидно
2. Ортогональное дополнение первого вектора ОНБ инвариантно относительно  $\varphi^*$ , как и относительно  $\varphi$  в силу самосопряжённости
3. Поэтому мы получили ортонормированный базис на сужении размерности  $n - 1$  и их объединение будет ОНБ на подпространстве соответствующей размерности

## 27 Ортогональные и унитарные преобразования, их свойства. Канонический вид унитарного и ортогонального преобразования. Нормальные преобразования унитарных пространств

### 27.1 Ортогональные и унитарные преобразования, их свойства

Опр Ортогональное (унитарное) преобразование  $(\varphi(a), \varphi(b)) = (a, b)$

Утв  $\varphi$  ортогонально (матрица перехода между ОНБ)  $\Leftrightarrow \varphi$  изоморфизм евклидовых (унитарных) пространств

$\Rightarrow$ : в силу биективности (ОНБ переходит в ортонормированную систему из  $n$  векторов, то есть в ОНБ, потому что скалярное произведение сохранено)  $\Leftarrow$ : достаточно расписать скалярное произведение двух произвольных векторов и воспользоваться изоморфностью (идея как при изоморфизме линейных пространств). Получим сохранение скалярного произведения и ортогональность  $\varphi$  по определению

Следствие 1 Ортогональное преобразование переводит ОНБ в ОНБ

**Следствие 2** Преобразование ортогонально  $\Leftrightarrow$  его матрица ортогональна

Потому как ортогональная матрица – матрица перехода между ОНБ

**Следствие 3** Преобразование ортогонально  $\Leftrightarrow \varphi$  обратимо и матрица  $\varphi^{-1} = \varphi^*$

Достаточно расписать определение унитарного преобразования

**Утв Групповые свойства**

Для ортогональных преобразований их композиция и обратное тоже ортогональное

Достаточно привести к определению

**Утв Характеристические числа ортогональных преобразований по модулю равны единице**

Достаточно расписать определение и вспомнить про комплексное сопряжение

## 27.2 Канонический вид унитарного и ортогонального преобразования

**Th Канонический вид унитарного преобразования**

Для унитарного преобразования существует ОНБ из собственных векторов

1. Пусть  $\dim E = n$ . В случае  $n = 1$  очевидно
2. Ортогональное дополнение первого вектора ОНБ инвариантно относительно  $\varphi^*$ , как и относительно  $\varphi^{-1}$  в силу ортогональности. При изучении инвариантных подпространств мы выяснили, что это эквивалентно инвариантности и относительно  $\varphi$
3. Поэтому мы получили ортонормированный базис на сужении размерности  $n - 1$  и их объединение будет ОНБ на подпространстве соответствующей размерности

## 28 Полярное разложение линейного преобразования в евклидовом пространстве, его существование

**Лемма О главных направлениях**

Для линейного преобразования  $\varphi$  существует ОНБ  $e_1, \dots, e_n : \varphi(e_1), \dots, \varphi(e_n)$  образуют ортогональную систему

Рассмотрим оператор  $\varphi^* \varphi$  (проверяется, что он СС) и ОНБ из его собственных векторов (по теореме). Далее, пользуясь СС-ю получаем, что  $(\varphi(e_i), \varphi(e_j)) = \dots = \lambda_i \delta_{ij}$

**Th** Для линейного преобразования  $\varphi \exists$  самосопряжённое преобразование  $\psi$  и ортогональное (унитарное)  $\theta$

1. Рассмотрим ортогональную систему из леммы, притом  $|\varphi(e_i)| = \sqrt{\lambda_i}$ . При необходимости, переупорядочим её
2. Ортнормируем систему и дополним её до ОНБ, убрав, при необходимости, нулевые векторы. Получим ОНБ  $f_1, \dots, f_n$
3. Теперь определим  $\psi = \varphi \theta^{-1}$  и убедимся, что  $\psi(f_i) = \dots = \sqrt{\lambda_i} f_i$
4. Итого, нужные отображения подобраны

Совсем необязательно, что данные преобразования коммутируют (перестановочны). Однако можно применить теорему к  $\varphi^*$  и взять сопряжение с обеих сторон. Тогда мы как раз получим другой порядок

## 29 Квадратичные (эрмитовы) формы в евклидовых (унитарных) пространствах. Присоединенный оператор. Существование ОНБ, в котором квадратичная (эрмитова) форма имеет диагональный вид. Применение к классификации кривых второго порядка. Одновременное приведение пары квадратичных форм к диагональному виду

### 29.1 Квадратичные (эрмитовы) формы в евклидовых (унитарных) пространствах

**Опр** Квадратичная форма в евклидовом пространстве  $\beta_\varphi(a, b) = (a, \varphi(b))$

**Утв** В случае ОНБ  $B = \bar{A}$

Пользуемся результатом действия билинейной формы на паре векторов и сравниваем записи.

В случае произвольного базиса  $B = \Gamma \bar{A}$

**Следствие 1** Задана биекция между линейными преобразованиями и билинейными формами

**Следствие 2** Задана биекция между множеством самосопряжённых операторов и квадратичных форм

Потому как и тем, и другим соответствует симметричная матрица

Итого, изучения билинейных форм можно свести к изучению операторов (и наоборот), а изучение квадратичных – к самосопряжённым операторам

## 29.2 Существование ОНБ, в котором квадратичная (эрмитова) форма имеет диагональный вид

**Th** Приведение к главным осям

Существует ОНБ, в котором матрица квадратичной формы над ЕП имеет диагональный вид

Следует из того, что для самосопряжённого оператора существует ОНБ, в котором его матрица диагональна. Она отличается от требуемой не более, чем сопряжением

## 29.3 Применение к классификации кривых второго порядка

**Лемма**  $\exists$  ПДСК, в которой кривая второго порядка задаётся уравнением без перекрёстных членов. Аналогично для поверхностей

Для предъявления такой ПДСК достаточно привести квадратичную форму к главным осям

## 29.4 Одновременное приведение пары квадратичных форм к диагональному виду

**Th** О паре форм

Если в векторном пространстве (без евклидовой / унитарной структуры) заданы две симметрические квадратичные формы, причём первая п.о. то существует базис, в котором первая имеет канонический вид, а вторая – диагональный

Достаточно объявить п.о. форму скалярным произведением. Тогда будет существовать базис, в котором вторая форма диагональна

# Сопряжённое пространство

## 30 Линейные функции. Сопряжённое пространство, его размерность. Биортогональный базис. Замена биортогональных базисов. Канонический изоморфизм пространства и дважды сопряжённого к нему

### 30.1 Линейные функции

**Опр** Линейная функция Отображение, удовлетворяющая двум аксиомам

### 30.2 Сопряжённое пространство, его размерность

**Опр** Сопряжённое (двойственное) пространство Пространство ...

Элементы сопряжённого пространства – линейные функционалы (функции), поэтому такие пространства также называют пространством линейных функций. Обозначаются как  $V^*$

**Утв**  $\dim V^* = \dim V$

Следует из  $\dim \mathbb{R} = \dim \mathbb{C} = 1$  и отождествления с матрицами размерности  $nm$

Применению линейной функции к вектору, удовлетворяющему четырём аксиомам, соответствует билинейная ( полуторалинейная) форма

### 30.3 Биортогональный базис

**Опр** Взаимный / биортогональный / двойственный базис  $\langle e_i, e^j \rangle = \delta_i^j$

**Утв** К данному базису существует и единственен взаимный

Любому элементу взаимного базиса соответствует строчная единица. Строчные единицы образуют базис в  $V$ , поэтому и элементы взаимного базиса образуют базис в  $V^*$ . Базис единственен по построению (в силу инъективности линейных функций)

**Утв** Двойственный базис является базисом в  $V^*$

В силу равенства размерностей пространств достаточно доказать л.н.з.  $f_1, \dots, f_n$ . Это делается от противного с применением  $e_j \forall j$  на линейной комбинации

**Утв** Если при фиксированном  $a \in V \langle a, l \rangle = 0 \forall l \in V^*$ , то  $a = 0$

От противного включим  $a$  в какой-то базис

**Утв**  $\langle a, l \rangle = x^i \bar{y}_i$

Следует из подстановки разложений по базисам и определения  $\delta_i^j$

**Следствие**  $\langle a, e^i \rangle = x^i$

### 30.4 Замена биортогональных базисов

**Утв** Если  $e' = eS, e'^* = e^*C$ , то  $C = (S^{-1})^*$

Тензорно запишем  $e'$  как строки матрицы на векторы-столбцы и введём  $R = C^T$ , чтобы аналогично сделать с  $e'^*$ . Затем раскроем по условию биортогональности и вернёмся к матричной записи

### 30.5 Канонический изоморфизм пространства и дважды сопряжённого к нему

**Опр** Канонический изоморфизм Не меняется при замене базиса

**Опр** Дважды сопряжённое пространство Отображение, сопоставляющее вектору  $a \in V$  отображение  $\bar{a} : V^* \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$  по правилу  $\langle l, \bar{a} \rangle = \langle a, l \rangle$  есть инъективный гомоморфизм (вложение)  $V \rightarrow V^{**}$

**Th** Канонический изоморфизм между  $V$  и  $V^{**}$

Между линейным пространством и дважды сопряжённым к нему существует канонический изоморфизм

Для доказательства достаточно проверить линейность по обоим аргументам и тривиальность ядра (всё по определению). По критерию изоморфности в силу инъективности (тривиальность ядра) имеем изоморфизм

## 31 Аннулятор подпространства, соответствие между подпространствами $V$ и $V^*$ . Сопряжённое преобразование, его свойства

### 31.1 Аннулятор подпространства, соответствие между подпространствами $V$ и $V^*$

**Опр** Биортогональные множества  $\forall a \in U \forall l \in W \langle a, l \rangle = 0$

**Утв** Признак биортогональности

$U \perp W \Leftrightarrow a_i \perp l_j$

$\Rightarrow$ : очевидно в силу вложенности  $\Leftarrow$ : из разложения по базису и линейности

**Опр** Аннулятор / биортогональное дополнение Множество  $W$  линейных функций

Обозначается как  $U^\perp$

**Опр** Нуль-пространство Обратное к аннулятору: множество  $U$  векторов

**Th**  $(U^\perp)^\perp = U$  и  $\dim U + \dim U^\perp = n$

1. Выберем базис  $e_1, \dots, e_k$  в  $U$  и дополним его до базиса во всём пространстве векторами  $e_{k+1}, \dots, e_n$
2. Далее рассмотрим линейную функцию, записанную в своём базисе и перейдём к системе, задающей  $\perp$
3. Получим, что тогда каждый коэффициент  $\lambda_i = 0, i \in \overline{1, k}$ , что говорит о структуре  $U^\perp$
4. Аналогичную операцию произведём в  $V^*$  и докажем первый факт
5. Собрав информацию о размерностях, получим второй факт

### 31.2 Сопряжённое преобразование, его свойства

**Опр** Сопряжённое преобразование Отображение уже из пространства функций

**Утв** Сопряжённое преобразование лежит в пространстве функций

Проверяется линейность (4 аксиомы) с использованием определения

**Утв** Сопряжённое преобразование соответствует матрица  $A^*$

Надо разложить в матричный вид равенства из определения сопряжённого пространства и сравнить их. Получив искомую структуру матрицы

**Следствие 1** Верны 4 равенства

Введём взаимные базисы и перейдём к матрицам. Доказательства очевидны случаю евклидова пространства

**Th**  $U$  инвариантно относительно  $\varphi \Leftrightarrow U^\perp$  инвариантно относительно  $\varphi^*$

$\Rightarrow$ : возьмём  $f \in U^\perp$  и распишем его применение по определению  $\Leftarrow$ : следует из  $\Rightarrow$ ,  $(U^\perp)^\perp = U$  и  $(\varphi^*)^* = \varphi$

**Th** Фредгольма

$$\ker \varphi^* = (\operatorname{Im} \varphi)^\perp$$

1. Аналогично случаю в ЕП: докажем вложенность ядра в чужой образ и равенство размерностей. Это будет означать требуемое равенство
2. Равенство размерностей доказывается по прошлым утверждениям
3. Чтобы доказать вложенность рассмотрим произвольный вектор ядра, воспользуемся определениями ортогонального дополнения, образа и сопряжённого преобразования

## Тензоры

**32 Полилинейные отображения. Определение тензора типа  $(p, q)$  на линейном пространстве  $V$ . Пространство  $T_q^p(V)$  тензоров типа  $(p, q)$ . Тензорный базис в  $T_q^p(V)$ . Изменение компонент тензора при замене базиса**

### 32.1 Полилинейные отображения