

LA E_χ 02

isagila

Собрано 10.06.2023 в 13:57



Содержание

1. Линейная алгебра	3
1.1. Евклидово пространство: определение, неравенство Коши-Буняковского. Нормированное евклидово пространство.	3
1.2. Ортонормированный базис, ортогонализация базиса. Матрица Грама.	3
1.3. Ортогональность вектора подпространству. Ортогональное дополнение. Теорема Пифагора.	4
1.4. Задача о перпендикуляре.	5
1.5. Линейный оператор: определение, основные свойства.	5
1.6. Обратный оператор. Взаимно-однозначный оператор. Ядро и образ оператора. Теорема о размерностях.	5
1.7. Матрица линейного оператора. Преобразование матрицы при переходе к новому базису.	7
1.8. Собственные числа и собственные векторы оператора. Теоремы о диагональной матрице оператора.	7
1.9. Сопряженный и самосопряженный операторы в вещественном евклидовом пространстве: определения, основные свойства. Свойства собственных чисел и собственных векторов самосопряженного оператора.	8
1.10. Структура образа самосопряженного оператора. Проектор. Спектральное разложение оператора.	8
1.11. Ортогональная матрица и ортогональный оператор. Поворот плоскости и пространства как ортогональное преобразование.	8
1.12. Билинейные формы: определения, свойства. Матрица билинейной формы.	8
1.13. Квадратичная форма: определения, приведение к каноническому виду.	8
1.14. Знакоопределенность квадратичной формы: необходимые и достаточные условия. Критерий Сильвестра.	8
2. Дифференциальные уравнения	9
2.1. Обыкновенное дифференциальное уравнение (ДУ): задача о радиоактивном распаде и задача о падении тела. Определение ДУ, решения ДУ и их геометрический смысл. Задача Коши.	9
2.2. Уравнение с разделяющимися переменными.	9
2.3. Однородное уравнение.	9
2.4. Уравнение в полных дифференциалах.	9
2.5. Линейное уравнение первого порядка. Метод Лагранжа.	10
2.6. Теорема существования и единственности решения задачи Коши. Особые решения.	10
2.7. Уравнения n -ого порядка, допускающие понижение порядка.	11
2.8. Линейные однородные дифференциальные уравнения (ЛОДУ) : определения, решение ЛОДУ ₂ с постоянными коэффициентами для случая различных вещественных корней характеристического уравнения.	11
2.9. Решение ЛОДУ ₂ с постоянными коэффициентами для случая вещественных кратных корней характеристического уравнения.	12
2.10. Решение ЛОДУ ₂ с постоянными коэффициентами для случая комплексных корней характеристического уравнения.	12
2.11. Свойства решений ЛОДУ ₂ : линейная независимость решений, определитель Вронского. Теоремы 1,2.	13
2.12. Свойства решений ЛОДУ ₂ : линейная комбинация решений, линейная зависимость решений. Определитель Вронского. Теоремы о вронскиане.	14
2.13. Свойства решений ЛОДУ ₂ : линейная комбинация решений, линейная зависимость решений. Теорема о структуре общего решения ЛОДУ ₂ . Фундаментальная система решений (определение).	15
2.14. Свойства решений ЛНДУ ₂ : теоремы о структуре общего решения и решении ДУ с суммой правых частей.	15
2.15. Структура решения ЛОДУ _n : линейная независимость решений, нахождение фундаментальной системы решений по корням характеристического уравнения.	16
2.16. Решение ЛНУ ₂ с постоянными коэффициентами: специальная правая часть, поиск частного решения методом неопределенных коэффициентов.	16
2.17. Решение ЛНУ ₂ : метод вариации произвольных постоянных (Лагранжа).	18
2.18. Системы дифференциальных уравнений: определения, решение методом исключения.	18
2.19. Системы дифференциальных уравнений: определения, решение матричным методом в случае различных вещественных собственных чисел.	19
2.20. Теория устойчивости: определение устойчивости по Ляпунову, фазовая плоскость, траектории ДУ. Примеры устойчивого и неустойчивого решения	19

1. Линейная алгебра

1.1. Евклидово пространство: определение, неравенство Коши-Буняковского. Нормированное евклидово пространство.

Def 1.1.1. Скалярным произведением называется функция двух элементов линейного пространства $x, y \in L^n$ обозначаемая $(x, y) \rightarrow \mathbb{R}$, для которой выполнены аксиомы: $\forall x, y \in L^n, \lambda \in \mathbb{C}$

1. $(x, y) = (y, x)$
2. $(\lambda x, y) = \lambda(x, y)$
3. $(x_1 + x_2, y) = (x_1, y) + (x_2, y)$
4. $(x, x) \geq 0, (x, x) = 0 \implies x = 0$

Def 1.1.2. Линейное пространство с введенным скалярным произведением называется евклидовым пространством E^n .

Замечание 1.1.3. Если $L = C_{[a;b]}$, то скалярное произведение обычно определяется как $(f, g) = \int_a^b f(x)g(x)dx$

Теорема 1.1.4. Неравенство Коши-Буняковского

$$(x, y)^2 \leq (x, x)(y, y)$$

Доказательство. Рассмотрим скалярное произведение:

$$\begin{aligned}(\lambda x - y, \lambda x - y) &\geq 0 \\(\lambda x - y, \lambda x - y) &= \lambda^2(x, x) - 2\lambda(x, y) + (y, y) \geq 0\end{aligned}$$

Полученное выражение можно рассмотреть как квадратное уравнение относительно λ . Т.к. оно неотрицательно $\forall \lambda$, то его дискриминант будет ≤ 0 . Таким образом

$$\begin{aligned}4\lambda^2(x, y)^2 - 4\lambda^2(x, x)(y, y) &\leq 0 \\(x, y)^2 - (x, x)(y, y) &\leq 0 \\(x, y)^2 &\leq (x, x)(y, y)\end{aligned}$$

■

Def 1.1.5. Нормой называется функция одного элемента линейного пространства $x \in L^n$, обозначаемая $\|x\|$ и определяемая аксиомами: $\forall x, y \in L^n, \lambda \in \mathbb{C}$:

1. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$
2. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$
3. $\|x\| \geq 0, \|x\| = 0 \implies x = 0$

Def 1.1.6. Евклидово пространство называется *нормированным*, если в нем определена норма.

Замечание 1.1.7. Чаще всего норма определяется как $\|x\| = \sqrt{(x, x)}$.

1.2. Ортонормированный базис, ортогонализация базиса. Матрица Грама.

Def 1.2.1. Углом между двумя элементами Евклидова пространства называется

$$\cos \angle(x, y) = \frac{(x, y)}{\|x\| \cdot \|y\|}$$

Def 1.2.2. Для элемента Евклидова пространства ортогональны, если их скалярное произведение равно нулю.

$$x \perp y \iff (x, y) = 0$$

Теорема 1.2.3. Во всяком E^n можно выделить ортонормированный базис размера n .

Доказательство. Пусть у нас есть базис $B = \{\beta_1, \dots, \beta_n\}$. Ортогонализируем его, полученный базис обозначим $\mathcal{E}' = \{e'_1, \dots, e'_n\}$. Этот базис можно нормировать и получить искомый ортонормированный базис $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$.

Процесс ортогонализации Грама-Шмидта:

Будем добавлять векторы в базис \mathcal{E} из базиса B по-одному:

База: начнем с одного произвольного вектора β_1 . Тогда $e'_1 = \beta_1$.

Переход: пусть у нас уже выделен набор из $k - 1$ ортогональных векторов $\{e'_1, \dots, e'_{k-1}\}$ и в него требуется добавить вектор β_k .

Будем искать e'_k в виде

$$e'_k = \beta_k + \lambda_1 e'_{k-1} + \lambda_2 e'_{k-2} + \dots + \lambda_{k-1} e'_1$$

Чтобы e'_k был ортогонален остальным векторам уже построенной системы, необходимо, чтобы скалярные произведения e'_k с остальными векторами системы равнялись нулю. Рассмотрим на примере e'_1 :

$$(e'_k, e'_1) = (\beta_k, e'_1) + \lambda_1 (e'_{k-1}, e'_1) + \dots + \lambda_{k-1} (e'_1, e'_1) = 0$$

Учитывая то, что построенная система ортогональна, то $(e'_i, e'_j) = 0$ ($i, j < k$). Значит выражение выше упрощается и остается:

$$\begin{aligned} (\beta_k, e'_1) + \lambda_{k-1} (e'_1, e'_1) &= 0 \\ \lambda_{k-1} &= -\frac{(\beta_k, e'_1)}{(e'_1, e'_1)} \end{aligned}$$

Аналогично можно получить оставшиеся коэффициенты λ_i . Тогда добавляемый в систему вектор e'_k будет иметь вид:

$$e'_k = \beta_k - \frac{(\beta_k, e'_{k-1})}{(e'_{k-1}, e'_{k-1})} \cdot e'_{k-1} - \dots - \frac{(\beta_k, e'_1)}{(e'_1, e'_1)} \cdot e'_1$$

■

Def 1.2.4. Матрицей Грама называется матрица составленная из скалярных произведений

$$\begin{pmatrix} (e_1, e_1) & \dots & (e_k, e_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (e_1, e_k) & \dots & (e_k, e_k) \end{pmatrix}$$

Замечание 1.2.5. В ортогональном базисе матрица Грама диагональная, а в ортонормированном — единичная.

1.3. Ортогональность вектора подпространству. Ортогональное дополнение. Теорема Пифагора.

Def 1.3.1. Пусть дано Евклидово пространство E^n . Элемент $h \in E^n$ называется ортогональным (перпендикулярным) подпространству $G \subset E^n$, если $\forall x \in G: h \perp x$.

Следствие 1.3.2. Выделим в подпространстве G базис $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_k\}$. Если $h \perp e_i \forall e_i \in \mathcal{E}$, то $h \perp G$.

Доказательство. Любой элемент $x \in G$ можно представить в виде $x = \sum_{i=1}^k \lambda_i e_i$. Рассмотрим скалярное произведение (h, x) . По свойствам линейности разложим его на $\sum_{i=1}^k \lambda_i (h, e_i)$. Т.к. h ортогонален каждому из базисных векторов, то полученная сумма будет равна нулю, значит h ортогонален любому $x \in G$. ■

Def 1.3.3. Пусть дано Евклидово пространство E^n . Ортогональным дополнением F к подпространству $G \subset E^n$ называется совокупность векторов $h \perp G$.

Замечание 1.3.4. Из определения 1.3.1 следует, что F также является подпространством E^n .

Теорема 1.3.5. Евклидово пространство E^n является прямой суммой подпространства $F \subset E^n$ и его ортогонального $G = F^\perp$.

$$E^n = F \oplus F^\perp$$

Доказательство. В Евклидовом пространстве E^n выделим базис, после чего разложим произвольный элемент пространства $x \in E^n$ по этому базису:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \underbrace{\{e_1, \dots, e_k\}}_{\text{Базис } G} \cup \{e_{k+1}, \dots, e_n\} \\ x &= \underbrace{x_1 e_1 + \dots + x_k e_k}_{\bar{x}} + \underbrace{x_{k+1} e_{k+1} + \dots + x_n e_n}_{\hat{x}} = \bar{x} + \hat{x} \end{aligned}$$

TODO: Дальше в конспекте что-то непонятное

■

TODO: Теорема Пифагора?

1.4. Задача о перпендикуляре.

1.5. Линейный оператор: определение, основные свойства.

Def 1.5.1. Пусть V^n, W^m линейные пространства. Отображение $\mathcal{A}: V^n \rightarrow W^m$, которое $\forall x \in V^n$ сопоставляет $y \in W^m$ называется линейным оператором при выполнении следующих условий: $\forall x_1, x_2 \in V^n, \lambda \in \mathbb{C}$:

1. $\mathcal{A}(x_1 + x_2) = \mathcal{A}x_1 + \mathcal{A}x_2$
2. $\mathcal{A}(\lambda x_1) = \lambda(\mathcal{A}x_1)$

Замечание 1.5.2. $y = \mathcal{A}x$ означает, что y порождается применением оператора \mathcal{A}

Обозначим некоторые базовые свойства линейных операторов. Пусть $\mathcal{A}, \mathcal{B}: V^n \rightarrow W^m$ это линейные операторы, тогда определены:

1. Сумма $(\mathcal{A} + \mathcal{B})x = \mathcal{A}x + \mathcal{B}x$
2. Умножение на число $(\lambda \mathcal{A})x = \lambda(\mathcal{A}x)$
3. Нулевой оператор $\Theta x = 0, \forall x \in V^n$
4. Противоположный оператор $-\mathcal{A} = (-1) \cdot \mathcal{A}$

Далее рассмотрим операторы $\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C}: V^n \rightarrow V^n$ действующие в одном линейном пространстве. Для таких операторов определена композиция (произведение) $(\mathcal{A} \cdot \mathcal{B})x = \mathcal{A}(\mathcal{B}x)$. В общем случае она не коммутативна $\mathcal{A} \cdot \mathcal{B} \neq \mathcal{B} \cdot \mathcal{A}$.

Свойства композиции операторов:

1. $\lambda(\mathcal{A} \cdot \mathcal{B}) = (\lambda \mathcal{A}) \cdot \mathcal{B}$
2. $(\mathcal{A} + \mathcal{B}) \cdot \mathcal{C} = \mathcal{A} \cdot \mathcal{C} + \mathcal{B} \cdot \mathcal{C}$
3. $\mathcal{A} \cdot (\mathcal{B} + \mathcal{C}) = \mathcal{A} \cdot \mathcal{B} + \mathcal{A} \cdot \mathcal{C}$
4. $\mathcal{A} \cdot (\mathcal{B} \cdot \mathcal{C}) = (\mathcal{A} \cdot \mathcal{B}) \cdot \mathcal{C}$

Def 1.5.3. Композиция оператора самим с собой n раз называется n -ой степенью оператора: $\mathcal{A}^n = \underbrace{\mathcal{A} \cdot \dots \cdot \mathcal{A}}_n$

Для степени оператора справедливо равенство $\mathcal{A}^{n+m} = \mathcal{A}^n \cdot \mathcal{A}^m$

1.6. Обратный оператор. Взаимно-однозначный оператор. Ядро и образ оператора. Теорема о размерностях.

Def 1.6.1. Оператор $I: V^n \rightarrow V^n$ называется тождественным оператором, если $Ix = x, \forall x \in V^n$.

Def 1.6.2. Пусть даны операторы $\mathcal{A}, \mathcal{B}: V^n \rightarrow V^n$. Оператор \mathcal{B} называется обратным для оператора \mathcal{A} , если их композиция равна тождественному оператору.

$$\mathcal{B} = \mathcal{A}^{-1} \iff \mathcal{A} \cdot \mathcal{B} = \mathcal{B} \cdot \mathcal{A} = I$$

Def 1.6.3. Оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ называется взаимно-однозначным, если разным $x \in V^n$ сопоставляются разные $y \in V^n$.

$$x \neq y \implies \mathcal{A}x \neq \mathcal{A}y \quad \forall x, y \in V^n$$

Lm 1.6.4. Если оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ взаимно-однозначный, то $\mathcal{A}x = 0 \implies x = 0$.

Доказательство. От противного

$$\begin{aligned} \square x = x_1 - x_2 \neq 0 &\implies x_1 \neq x_2 \\ \mathcal{A}x = \mathcal{A}(x_1 - x_2) &= \mathcal{A}x_1 - \mathcal{A}x_2 = 0 \implies \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}x_2 \end{aligned}$$

Это невозможно, т.к. \mathcal{A} взаимно-однозначный. ■

Теорема 1.6.5. Взаимно-однозначный оператор переводит линейно-независимый набор в линейно-независимый набор.

Доказательство. Пусть дан взаимно-однозначный оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ и линейно-независимый набор $\{x_1, \dots, x_n\}$. Построим набор образов $\{\mathcal{A}x_1, \dots, \mathcal{A}x_n\}$. Составим его нулевую линейную комбинацию, после чего воспользуемся линейностью оператора:

$$\begin{aligned}\lambda_1 \mathcal{A}x_1 + \dots + \lambda_n \mathcal{A}x_n &= 0 \\ \mathcal{A}(\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n) &= 0\end{aligned}$$

По 1.6.4 получаем, что $\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n = 0$. Т.к. набор $\{x_1, \dots, x_n\}$ линейно независим, то $\forall \lambda_i = 0$ ■

Следствие 1.6.6. Взаимно-однозначный оператор переводит базис в базис.

Теорема 1.6.7. Оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ взаимно-однозначный $\iff \exists \mathcal{A}^{-1}$.

Доказательство. \implies Пусть $x \xrightarrow{\mathcal{A}} y$. Рассмотрим оператор \mathcal{B} такой, что $y \xrightarrow{\mathcal{B}} x$. Т.к. \mathcal{A} взаимно-однозначный, то $\mathcal{A} \cdot \mathcal{B} = I$.

\Leftarrow От противного

$$\begin{aligned}\square x_1 \neq x_2, \mathcal{A}x_1 &= \mathcal{A}x_2 = x \\ x_1 &= \mathcal{A}^{-1} \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}^{-1} x \\ x_2 &= \mathcal{A}^{-1} \mathcal{A}x_2 = \mathcal{A}^{-1} x \\ x_1 \neq x_2 &\implies \mathcal{A}^{-1} x \neq \mathcal{A}^{-1} x\end{aligned}$$

Получили противоречие. ■

Def 1.6.8. Пусть дан линейный оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow W^m$. Множество $\text{Ker } \mathcal{A} = \{x \in V^n \mid \mathcal{A}x = 0\}$ называется ядром оператора \mathcal{A} .

Lm 1.6.9. Оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ взаимно-однозначный $\implies \text{Ker } \mathcal{A} = \{0\}$.

Доказательство. От противного, пусть $x \neq 0 \in \text{Ker } \mathcal{A}$. Тогда по 1.6.4 $\mathcal{A}0 = 0$, но в то же время $\mathcal{A}x = 0, x \neq 0$. Нарушается взаимно-однозначность. ■

Def 1.6.10. Пусть дан линейный оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow W^m$. Множество $\text{Im } \mathcal{A} = \{y \in W^m \mid \exists x \in V^n: y = \mathcal{A}x\}$ называется образом оператора \mathcal{A} .

Теорема 1.6.11. Пусть дан оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$. Тогда

$$\dim \text{Ker } \mathcal{A} + \dim \text{Im } \mathcal{A} = n$$

Доказательство. Т.к. $\text{Ker } \mathcal{A}$ и $\text{Im } \mathcal{A}$ это подпространства V^n , то $\exists W \subset V^n \mid W \oplus \text{Ker } \mathcal{A} = V^n$. Тогда $\dim W + \dim \text{Ker } \mathcal{A} = n$. Требуется доказать, что $\dim W = \dim \text{Im } \mathcal{A}$.

Сначала покажем, что $\mathcal{A}: W \rightarrow \text{Im } \mathcal{A}$ взаимно-однозначный. От противного:

$$\begin{aligned}\square x_1 \neq x_2 \in W: \mathcal{A}x_1 &= \mathcal{A}x_2 \\ \mathcal{A}x_1 = \mathcal{A}x_2 &\implies \mathcal{A}(x_1 - x_2) = 0 \implies (x_1 - x_2) \in \text{Ker } \mathcal{A} \\ x_1, x_2 \in W &\implies (x_1 - x_2) \in W\end{aligned}$$

Но это невозможно, т.к. $W \oplus \text{Ker } \mathcal{A} = V^n \implies W \cap \text{Ker } \mathcal{A} = \emptyset$.

В $\text{Im } \mathcal{A}$ выделим базис $\{y_1, \dots, y_k\}$. Т.к. \mathcal{A} взаимно-однозначный, то выделенный базис порождается линейно-независимым набором (см. 1.6.5) $\{x_1, \dots, x_k\}, x_i \in W$. Значит $\dim W \geq \dim \text{Im } \mathcal{A}$.

Предположим, что $\dim W > \dim \text{Im } \mathcal{A}$. Обозначим $\dim W = p$, дополним систему $\{x_1, \dots, x_k\}$ до p линейно-независимых векторов. Т.к. оператор $\mathcal{A}: W \rightarrow \text{Im } \mathcal{A}$ взаимно-однозначный, то он должен перевести полученную линейно-независимую систему в линейно-независимую. Однако это невозможно, т.к. $\text{Im } \mathcal{A}$ имеет базис меньшей размерности. ■

Замечание 1.6.12. Можно доказать, что

$$\begin{cases} V_1 \subset V^n \\ V_2 \subset V^n \\ \dim V_1 + \dim V_2 = n \end{cases} \implies \exists \mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n, \text{Ker } \mathcal{A} = V_1, \text{Im } \mathcal{A} = V_2$$

Def 1.6.13. Рангом оператора $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ называется размерность его образа:

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

Пусть $\mathcal{A}, \mathcal{B}: V^n \rightarrow V^n$. Рассмотрим некоторые свойства ранга линейного оператора:

1. Если оператор \mathcal{A} взаимно-однозначный, то $\text{rang } \mathcal{A} = n$ (это следствие из 1.6.11).
2. $\text{rang}(\mathcal{A} \cdot \mathcal{B}) \leq \text{rang } \mathcal{A}, \text{rang}(\mathcal{A} \cdot \mathcal{B}) \leq \text{rang } \mathcal{B}$
3. $\text{rang}(\mathcal{A} \cdot \mathcal{B}) = \text{rang } \mathcal{A} + \text{rang } \mathcal{B} - \dim V$

1.7. Матрица линейного оператора. Преобразование матрицы при переходе к новому базису.

Пусть дан оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ и $x, y \in V^n, \mathcal{A}x = y$.

Выделим в V^n базис, разложим x по этому базису. После чего применим к нему оператор \mathcal{A} :

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= \{e_1, \dots, e_n\} \\ x &= x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \\ y &= x_1 \mathcal{A}e_1 + \dots + x_n \mathcal{A}e_n\end{aligned}$$

Далее применим оператор к каждому из базисных векторов:

$$\begin{aligned}\mathcal{A}e_i &= a_{1,i}e_1 + \dots + a_{n,i}e_n \\ y &= x_1(a_{1,1}e_1 + \dots + a_{n,1}e_n) + \dots + x_n(a_{1,n}e_1 + \dots + a_{n,n}e_n) \\ y &= e_1(x_1 a_{1,1} + \dots + x_n a_{1,n}) + \dots + e_n(x_1 a_{n,1} + \dots + x_n a_{n,n})\end{aligned}$$

Заметим, что y также можно разложить по базису. Составим СЛАУ и запишем её в матричном виде:

$$\left\{ \begin{array}{cccc} x_1 a_{1,1} & + \dots + & x_n a_{1,n} & = & y_1 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ x_n a_{n,1} & + \dots + & x_n a_{n,n} & = & y_n \end{array} \right\} \iff AX = Y$$

Def 1.7.1. Матрицей оператора \mathcal{A} в данном базисе называется матрица составленная из столбцов-коэффициентов разложения образов базисных векторов по этому же базису.

Замечание 1.7.2. Если $A^{-1} = A^T$, то матрица оператора называется ортогональной.

TODO: Переход к новому базису

1.8. Собственные числа и собственные векторы оператора. Теоремы о диагональной матрице оператора.

Def 1.8.1. Пусть дан оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ с матрицей A в некотором базисе $\mathcal{E} = \{e_i\}_{i=1}^n$. Тогда многочлен

$$\det(A - \lambda E)$$

относительно $\lambda \in \mathbb{R}$ называется характеристическим многочленом.

Def 1.8.2. Пусть дан оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$. Подпространство $U \subseteq V^n$ называется *инвариантным*, если

$$\forall x \in U: \mathcal{A}x \in U$$

Def 1.8.3. Пусть дан оператор $\mathcal{A}: V^n \rightarrow V^n$ с матрицей A в некотором базисе $\mathcal{E} = \{e_i\}_{i=1}^n$.

$x \neq 0 \in V^n$ называется собственным вектором для оператора \mathcal{A} , если

$$\exists \lambda \in \mathbb{C}: \mathcal{A}x = \lambda x$$

Тогда λ называется собственным числом (собственным значением) оператора \mathcal{A} .

Теорема 1.8.4. Собственные числа оператора являются корнями характеристического многочлена $\det(A - \lambda E)$.

Доказательство. \implies Пусть λ – собственное число, тогда

$$\begin{aligned}\exists x \neq 0 \in V^n \mid \mathcal{A}x &= \lambda x \\ \mathcal{A}x = \lambda x &\implies Ax = (\lambda E)x \implies (A - \lambda E)x = 0\end{aligned}$$

Теперь рассмотрим оператор $\mathcal{B}: V^n \rightarrow V^n, \mathcal{B} = \mathcal{A} - \lambda I$:

$$(A - \lambda E)x = 0 \implies \mathcal{B}x = 0$$

$$x \neq 0 \in \text{Ker } \mathcal{B} \implies \dim \text{Ker } \mathcal{B} > 0$$

$$\begin{cases} \dim \text{Ker } \mathcal{B} + \dim \text{Im } \mathcal{B} = n \text{ (1.6.11)} \\ \dim \text{Ker } \mathcal{B} > 0 \end{cases} \implies \dim \text{Im } \mathcal{B} < n$$

$$\dim \text{Im } \mathcal{B} < n \implies \text{rang } \mathcal{B} < n \implies \text{rang } B < n$$

$$\text{rang } B < n \implies \text{rang}(A - \lambda E) < n \implies \det(A - \lambda E) = 0$$

\Leftarrow Аналогичные рассуждения, но в обратную сторону

$$\det(A - \lambda E) = 0 \implies \text{rang}(A - \lambda E) < n \implies \text{rang } B < n$$

$$\text{rang } B < n \implies \text{rang } \mathcal{B} < n \implies \dim \text{Im } \mathcal{B} < n$$

$$\begin{cases} \dim \text{Ker } \mathcal{B} + \dim \text{Im } \mathcal{B} = n \text{ (1.6.11)} \\ \dim \text{Im } \mathcal{B} < n \end{cases} \implies \dim \text{Ker } \mathcal{B} > 0$$

$$\dim \text{Ker } \mathcal{B} > 0 \implies \exists x \neq 0: \mathcal{B}x = 0$$

$$\mathcal{B}x = 0 \implies (A - \lambda E)x = 0 \implies \mathcal{A}x = \lambda x$$

■

Def 1.8.5. Полученное в процессе доказательства 1.8.4 уравнение

$$(A - \lambda E)x = 0$$

называют характеристическим (вековым) уравнением.

Def 1.8.6. Базис, составленный из собственных векторов, называют собственным базисом.

Теорема 1.8.7. Матрица оператора в собственном базисе диагональна.

Доказательство. Матрица оператора в некотором базисе это коэффициенты разложения образов базисных векторов по этому же базису. Рассмотрим первый базисный вектор:

$$\begin{cases} \mathcal{A}e_1 = a_{1,1}e_1 + \dots + a_{n,1}e_n \\ \mathcal{A}e_1 = \lambda_1 e_1 \end{cases} \implies \begin{cases} a_{1,1} = \lambda_1, \\ a_{i,1} = 0 \forall i \neq 1 \end{cases}$$

Аналогично можно рассмотреть все оставшиеся базисные векторы. Таким образом матрица оператора в базисе из собственных векторов будет иметь вид

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

■

1.9. Сопряженный и самосопряженный операторы в вещественном евклидовом пространстве: определения, основные свойства. Свойства собственных чисел и собственных векторов самосопряженного оператора.

1.10. Структура образа самосопряженного оператора. Проектор. Спектральное разложение оператора.

1.11. Ортогональная матрица и ортогональный оператор. Поворот плоскости и пространства как ортогональное преобразование.

1.12. Билинейные формы: определения, свойства. Матрица билинейной формы.

1.13. Квадратичная форма: определения, приведение к каноническому виду.

1.14. Знакоопределенность квадратичной формы: необходимые и достаточные условия. Критерий Сильвестра.

2. Дифференциальные уравнения

2.1. Обыкновенное дифференциальное уравнение (ДУ): задача о радиоактивном распаде и задача о падении тела. Определение ДУ, решения ДУ и их геометрический смысл. Задача Коши.

2.2. Уравнение с разделяющимися переменными.

Def 2.2.1. Уравнение вида

$$m(x)N(y)dx + M(x)n(y)dy = 0$$

называется уравнением с разделяющимися переменными.

Для решения таких уравнений необходимо разделить обе части на $M(x)N(y)$, перенести одно из слагаемых в правую часть, после чего проинтегрировать обе части.

$$\begin{aligned} m(x)N(y)dx + M(x)n(y)dy &= 0 \\ \frac{m(x)}{M(x)}dx + \frac{n(y)}{N(y)}dy &= 0 \\ \int \frac{m(x)}{M(x)}dx &= - \int \frac{n(y)}{N(y)}dy \end{aligned}$$

Замечание 2.2.2. В случае, если $M(x) = 0$ или $N(y) = 0$, то уравнение решается непосредственным интегрированием.

Замечание 2.2.3. Решения вида $x = const, y = const$ не всегда получаемы из общего решения.

2.3. Однородное уравнение.

Def 2.3.1. Функция $f(x, y)$ называется *однородной m -ого измерения* ($m \geq 0$), если $f(\lambda x, \lambda y) = \lambda^m f(x, y)$.

Def 2.3.2. Дифференциальное уравнение $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ называется *однородным*, если $P(x, y)$ и $Q(x, y)$ однородные функции одного измерения m .

Однородные уравнения решаются заменой $t = \frac{y}{x}$. Покажем, откуда появляется подобная замена. Преобразуем функции $P(x, y)$ и $Q(x, y)$:

$$\begin{aligned} P(x, y) &= P\left(x \cdot 1, x \cdot \frac{y}{x}\right) = x^m P\left(1, \frac{y}{x}\right) \\ Q(x, y) &= Q\left(x \cdot 1, x \cdot \frac{y}{x}\right) = x^m Q\left(1, \frac{y}{x}\right) \end{aligned}$$

Вернемся к исходному уравнению:

$$\begin{aligned} P(x, y)dx + Q(x, y)dy &= 0 \mid : dx \\ y' &= -\frac{P(1, y/x)}{Q(1, y/x)} = f\left(1, \frac{y}{x}\right) \\ \frac{y}{x} = t &\implies \begin{cases} f(1, y/x) = \tilde{f}(t) \\ y = xt, \quad y'_x = t + xt' \\ t + xt' = \tilde{f}(t) \\ x \cdot \frac{dt}{dx} = \tilde{f}(t) - t \\ \frac{dt}{\tilde{f}(t) - t} = \frac{dx}{x} \end{cases} \end{aligned}$$

Таким образом исходное однородное уравнение сводится к уравнению с разделяющимися переменными.

Замечание 2.3.3. Случай $\tilde{f}(t) - t = 0$ нужно рассмотреть отдельно.

2.4. Уравнение в полных дифференциалах.

Def 2.4.1. Дифференциальное уравнение $P(x, y)dx + Q(x, y)dy = 0$ называется уравнением в полных дифференциалах, если

$$\exists z(x, y): dz = P(x, y)dx + Q(x, y)dy$$

Критерием того, что данное уравнение является уравнением в полных дифференциалах может служить равенство

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial y}$$

Решение уравнений в полных дифференциалах сводится к поиску функции $z(x, y)$, удовлетворяющей условиям. Про то, как найти такую функцию можно прочесть в конспекте по математическому анализу в разделе про интегралы, независимые от пути. После того, как такая функция будет найдена, решить ДУ не составит проблем:

$$\begin{aligned} P(x, y)dx + Q(x, y)dy &= 0 \\ dz &= 0 \\ z &= C \end{aligned}$$

TODO: Интегрирующий множитель

2.5. Линейное уравнение первого порядка. Метод Лагранжа.

Def 2.5.1. Линейным однородным уравнением первого порядка (ЛОДУ₁) называется уравнение вида

$$y' + p(x)y = 0$$

ЛОДУ₁ является уравнением с разделяющимися переменными, поэтому оно решается следующим образом:

$$\begin{aligned} y' + p(x)y &= 0 \\ \frac{dy}{dx} &= -p(x)y \\ \frac{dy}{y} &= -p(x)dx \\ \bar{y} &= C \cdot \underbrace{e^{-\int p(x)dx}}_{y_1} \end{aligned}$$

Замечание 2.5.2. При решении данного уравнения мы поделили на $y \neq 0$. Заметим, что $y = 0$ также является решением ЛОДУ₁, однако оно получаемо из общего решения при $C = 0$.

Def 2.5.3. Линейным неоднородным уравнением первого порядка (ЛНДУ₁) называется уравнение вида

$$y' + p(x)y = q(x), \quad q(x) \neq 0$$

Метод Лагранжа (метод вариации произвольной постоянной) для решения ЛНДУ₁:

1. Найдем частное решение y_1 соответствующего однородного уравнения.
2. Будем искать решение ЛНДУ₁ в виде $y(x) = y_1(x) \cdot C(x)$. Преобразуем ДУ в соответствии с этой заменой

$$\begin{aligned} y' + p(x)y &= q(x) \\ y_1'(x)C(x) + y_1(x)C'(x) + p(x)y_1(x)C(x) &= q(x) \\ y_1(x)C'(x) + C(x) \underbrace{\left(y_1'(x) + p(x)y_1(x) \right)}_{=0} &= q(x) \\ y_1(x)C'(x) &= q(x) \\ C(x) &= \int \frac{q(x)}{y_1(x)} dx + C \end{aligned}$$

3. Подставим найденную функцию $C(x)$ в $y(x) = y_1(x) \cdot C(x)$.

TODO: Уравнение Бернулли, Клеро, Риккати и пр.

2.6. Теорема существования и единственности решения задачи Коши. Особые решения.

Теорема 2.6.1. О существовании и единственности решения задачи Коши.

Пусть дана задача Коши

$$\begin{cases} y' = g(x, y) \\ y_0 = y(x_0) \end{cases}$$

и $u(M_0)$ – окрестность точки $M_0(x_0, y_0)$. Тогда, если g непрерывна в $u(M_0)$, а g'_y – ограничена, то существует единственное решение задачи Коши.

Def 2.6.2. Особым решением ДУ называется решение, в каждой точке которого нарушается единственность.

Замечание 2.6.3. Геометрически особое решение это интегральная кривая, через каждую точку которой проходит другая интегральная кривая.

Def 2.6.4. Точка $M(x, y) \in D$ (где D - область заполненная интегральными кривыми) называется обыкновенной, если через неё проходит ровно одна интегральная кривая.

Def 2.6.5. Точка, не являющаяся обыкновенной, называется особой. Через неё может проходить несколько интегральных кривых, либо не проходить ни одной.

Lm 2.6.6. Если ДУ задано в дифференциалах $Pdx + Qdy = 0$, то условие особой точки имеет вид $P = 0$ или $Q = 0$.

Доказательство. ДУ в дифференциалах можно разрешить относительно каждой из переменных:

$$\begin{aligned}y' &= -\frac{P}{Q} = g_1(x, y) \\x' &= -\frac{Q}{P} = g_2(x, y)\end{aligned}$$

Далее можно применить теорему 2.6.1 о единственности к каждому из полученных уравнений. Непрерывность g_1, g_2 нарушается при $Q = 0$ и $P = 0$ соответственно. Это и будет условием особой точки. ■

TODO: Перечитать неплохо было бы... а то мутновато как-то

2.7. Уравнения n -ого порядка, допускающие понижение порядка.

К уравнениям, допускающим понижение порядка относятся:

1. Непосредственно интегрируемые уравнения вида $y^{(n)}(x) = f(x)$.
Они решаются интегрированием обеих частей n раз.
2. Уравнения не содержащие $y(x)$ в явном виде.
Они решаются заменой $z(x) = y'(x)$, $z'(x) = y''(x)$.
Замечание 2.7.1. В общем случае производится замена самой младшей из присутствующих производных.
3. Уравнения не содержащие x в явном виде.
Они решаются заменой $z(y) = y'(x)$, тогда $y''(x) = z'_y y'_x = z'(y) \cdot z(y)$

2.8. Линейные однородные дифференциальные уравнения (ЛОДУ) : определения, решение ЛОДУ₂ с постоянными коэффициентами для случая различных вещественных корней характеристического уравнения.

Def 2.8.1. Линейным дифференциальным уравнением n -ого порядка (ЛДУ _{n}) называется

$$a_0(x)y^{(n)}(x) + a_1(x)y^{(n-1)}(x) + \dots + a_n(x)y(x) = f(x), \quad a_0(x) \neq 0$$

Def 2.8.2. Разрешенным ЛДУ _{n} называется

$$y^{(n)}(x) + b_1(x)y^{(n-1)}(x) + \dots + b_n(x)y(x) = f(x)$$

Def 2.8.3. Если в ЛДУ _{n} $\forall i: a_i(x) = p_i \in \mathbb{R}$, то такое ЛДУ _{n} называется ЛДУ _{n} с постоянными коэффициентами. Оно имеет вид

$$y^{(n)}(x) + p_1 y^{(n-1)}(x) + \dots + p_n y(x) = f(x)$$

Def 2.8.4. Линейным однородным дифференциальным уравнением n -ого порядка называется ЛДУ _{n} вида

$$a_0(x)y^{(n)}(x) + a_1(x)y^{(n-1)}(x) + \dots + a_n(x)y(x) = 0,$$

Def 2.8.5. Линейным неоднородным дифференциальным уравнением n -ого порядка называется ЛДУ _{n} вида

$$a_0(x)y^{(n)}(x) + a_1(x)y^{(n-1)}(x) + \dots + a_n(x)y(x) = f(x), \quad f(x) \neq 0$$

Рассмотрим ЛОДУ₂ вида $y'' + py' + qy = 0$. Любой паре $(p, q) \in \mathbb{R}^2$ можно поставить в соответствие квадратное уравнение $k^2 + pk + q = 0$. По т. Виета $p = -(k_1 + k_2)$, $q = k_1 k_2$, где k_1, k_2 это корни уравнения. Подставим полученные выражения в исходное ДУ:

$$\begin{aligned}
y'' - (k_1 + k_2)y' + k_1k_2 &= 0 \\
y'' - k_1y' - k_2y' + k_1k_2 &= 0 \\
(y'' - k_2y') - k_1(y' - k_2) &= 0 \\
\sqcap u(x) &= y' - k_2y \\
u' - k_1u = 0 &\implies u(x) = c_1e^{k_1x} \implies y' - k_2y = c_1e^{k_1x}
\end{aligned}$$

Сначала найдем частное решение соответствующего ЛОДУ₁: $\bar{y} = c_2e^{k_2x}, y_1 = e^{k_2x}$. Далее будем варьировать постоянную c_2 , тогда $y(x) = C_2(x)e^{k_2x}$. Подставим это в исходное ДУ:

$$\begin{aligned}
C_2'(x)e^{k_2x} + C_2(x) \cdot k_2 \cdot e^{k_2x} - k_2 \cdot C_2(x)e^{k_2x} &= c_1e^{k_1x} \\
C_2'(x)e^{k_2x} &= c_1e^{k_1x}
\end{aligned}$$

В итоге получаем уравнение

$$\boxed{C_2'(x) = c_1e^{(k_1-k_2)x}} \quad (\star)$$

Проанализируем это уравнение. Всего будет рассмотрено 3 случая: один в этом параграфе, остальные — в двух последующих.

(★) **случай I:** $k_1 \neq k_2, k_1, k_2 \in \mathbb{R}$

В заданных ограничениях имеем

$$\begin{aligned}
C_2'(x) &= c_1e^{(k_1-k_2)x} \\
C_2(x) &= \frac{c_1}{k_1 - k_2} e^{(k_1-k_2)x} + \tilde{c}_2 \\
y(x) = C_2(x)y_1(x) &= \underbrace{\frac{c_1}{k_1 - k_2}}_{\tilde{c}_1} e^{k_1x} + \tilde{c}_2e^{k_2x} \\
y(x) &= \tilde{c}_1e^{k_1x} + \tilde{c}_2e^{k_2x}
\end{aligned}$$

2.9. Решение ЛОДУ₂ с постоянными коэффициентами для случая вещественных кратных корней характеристического уравнения.

(★) **случай II:** $k_1 = k_2, k_1, k_2 \in \mathbb{R}$

Пусть $k_1 = k_2 = k$, тогда получаем:

$$\begin{aligned}
C_2'(x) &= c_1e^{(k_1-k_2)x} \\
C_2(x) &= c_1x + c_2 \\
y(x) = C_2(x)y_1(x) &= (c_1x + c_2)e^{kx} \\
y(x) &= c_1x \cdot e^{kx} + c_2e^{kx}
\end{aligned}$$

2.10. Решение ЛОДУ₂ с постоянными коэффициентами для случая комплексных корней характеристического уравнения.

(★) **случай III:** $k_{1,2} = \alpha + \beta i, k_{1,2} \in \mathbb{C}$

В заданных ограничениях получаем

$$\begin{aligned}
C_2'(x) &= c_1e^{(k_1-k_2)x} \\
C_2(x) &= \frac{c_1}{k_1 - k_2} e^{(k_1-k_2)x} + \tilde{c}_2 \\
y(x) = C_2(x)y_1(x) &= \underbrace{\frac{c_1}{k_1 - k_2}}_{\tilde{c}_1} e^{k_1x} + \tilde{c}_2e^{k_2x} \\
y(x) &= \tilde{c}_1e^{k_1x} + \tilde{c}_2e^{k_2x} \\
y(x) &= \tilde{c}_1e^{\alpha x}e^{\beta ix} + \tilde{c}_2e^{\alpha x}e^{-\beta ix}
\end{aligned}$$

Далее используем формулу $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$:

$$\begin{aligned}
y(x) &= e^{\alpha x} \left(\tilde{c}_1 \left(\cos(\beta x) + i \sin(\beta x) \right) + \tilde{c}_2 \left(\cos(\beta x) - i \sin(\beta x) \right) \right) \\
y(x) &= e^{\alpha x} \left(\cos(\beta x) \underbrace{(\tilde{c}_1 + \tilde{c}_2)}_{\hat{c}_1} + i \sin(\beta x) \underbrace{(\tilde{c}_1 - \tilde{c}_2)}_{\hat{c}_2} \right) \\
y(x) &= e^{\alpha x} \left(\hat{c}_1 \cos(\beta x) + \hat{c}_2 i \sin(\beta x) \right)
\end{aligned}$$

TODO: Конспект не очень хороший в этом моменте, возможно что-то неправильно

Lm 2.10.1. Если $y(x) = u(x) + iv(x)$ это решение ЛОДУ₂, то $y(x) = u(x) + v(x)$ также являются решением ЛОДУ₂.

Доказательство. Рассмотрим функцию $y(x) = u(x) + v(x)$:

$$\begin{aligned}
&\begin{cases} y(x) = u(x) + v(x) \\ y'(x) = u'(x) + v'(x) \\ y''(x) = u''(x) + v''(x) \end{cases} \\
y''(x) + py'(x) + qy(x) &= u''(x) + v''(x) + pu'(x) + pv'(x) + u(x) + qu(x) + qv(x) = 0 \\
&\left(u''(x) + pu'(x) + qu(x) \right) + \left(v''(x) + pv'(x) + qv(x) \right) = 0
\end{aligned}$$

Это равенство верно, т.к. $u(x)$ и $v(x)$ решения ЛОДУ₂. ■

Значит, по 2.10.1 общее решение (★) в третьем случае будет иметь вид

$$y(x) = e^{\alpha x} \left(\hat{c}_1 \cos(\beta x) + \hat{c}_2 \sin(\beta x) \right)$$

2.11. Свойства решений ЛОДУ₂: линейная независимость решений, определитель Вронского. Теоремы 1,2.

Рассмотрим множество Ω непрерывных функций с непрерывными производными 2ого порядка. Определим линейный дифференциальный оператор $\mathcal{L}[y] = y'' + py' + q \rightarrow f(x)$.

Def 2.11.1. Будем называть функции y_1, \dots, y_n линейно-независимыми на отрезке $[a; b]$, если

$$\sum_{i=1}^n c_i y_i = 0 \implies \forall c_i = 0$$

Def 2.11.2. Определитель Вронского (вронскиан) \mathcal{W} это определитель, составленный из n функций и всех их производных вплоть до $(n-1)$ -ого порядка. Он имеет вид:

$$\mathcal{W} = \begin{vmatrix} y_1 & \dots & y_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1^{(n-1)} & \dots & y_n^{(n-1)} \end{vmatrix}$$

Lm 2.11.3. Если два решения ЛОДУ₂ линейно-зависимы на $[a; b]$, то их вронскиан на $[a; b]$ равен нулю.

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}[y_1] &= 0 \\ \mathcal{L}[y_2] &= 0 \\ y_1 &= \lambda y_2 \end{aligned} \right\} \implies \mathcal{W} = 0$$

Доказательство.

$$\mathcal{W} = \begin{vmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \lambda y_2 & y_2 \\ \lambda y_2' & y_2' \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} y_2 & y_2 \\ y_2' & y_2' \end{vmatrix} = 0$$

Lm 2.11.4. Если два решения ЛОДУ₂ линейно-независимы на $[a; b]$, то их вронскиан на $[a; b]$ не равен нулю. ■

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}[y_1] &= 0 \\ \mathcal{L}[y_2] &= 0 \\ y_1 &\neq \lambda y_2 \end{aligned} \right\} \implies \mathcal{W} \neq 0$$

Доказательство. От противного

$$\begin{aligned}\square \mathcal{W} = 0 &= \begin{vmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{vmatrix} = y_1 y_2' - y_1' y_2 \mid : y_1^2 \neq 0 \\ &\frac{y_1 y_2' - y_1' y_2}{y_1^2} = 0 \\ &\left(\frac{y_2}{y_1} \right)' = 0 \\ &\frac{y_2}{y_1} = \text{const} \\ &y_1 = \lambda y_2\end{aligned}$$

Получили противоречие. ■

Теорема 2.11.5. Линейная зависимость/независимость функций определяется равенством их вронскиана нулю.

Доказательство. Следствие из 2.11.3 и 2.11.4. ■

Замечание 2.11.6. Для проверки набора функций на линейную зависимость/независимость лучше использовать именно вронскиан, а не непосредственное определение линейной зависимости функций на отрезке.

Теорема 2.11.7. Рассмотрим функции на отрезке $[a; b]$. Если на этом отрезке найдется точка, в которой вронскиан равен нулю, вронскиан будет равен нулю на всем отрезке. Дуально, если найдется точка, в которой вронскиан не равен нулю, то он будет не равен нулю на всем отрезке.

$$\begin{aligned}\exists x_0 \in [a; b] \mid W(x_0) = W_0 \neq 0 &\implies \forall x \in [a, b]: W(x) \neq 0 \\ \exists x_0 \in [a; b] \mid W(x_0) = W_0 = 0 &\implies \forall x \in [a, b]: W(x) = 0\end{aligned}$$

Доказательство. Пусть y_1 и y_2 это решения ДУ, тогда

$$\begin{aligned}\left\{ \begin{aligned} y_2'' + p y_2' + q y_2 &= 0 \cdot y_1 y_1'' + p y_1' + q y_1 = 0 \mid \cdot y_2 &- \\ (y_1 y_2'' - y_2 y_1'') + p(y_1 y_2' - y_1' y_2) &= 0 \end{aligned} \right.\end{aligned}$$

Заметим, что выражение в левой скобке это \mathcal{W}' , а в правой — \mathcal{W} :

$$\begin{aligned}\mathcal{W} &= y_1 y_2' - y_1' y_2 \\ \mathcal{W}' &= (y_1 y_2' - y_1' y_2)' = y_1' y_2' + y_1 y_2'' - y_1'' y_2 - y_1' y_2' = y_1 y_2'' - y_1'' y_2\end{aligned}$$

Подставим это в полученное ранее уравнение:

$$\begin{aligned}(y_1 y_2'' - y_2 y_1'') + p(y_1 y_2' - y_1' y_2) &= 0 \\ \mathcal{W}' + p\mathcal{W} &= 0 \\ \mathcal{W} &= c_1 e^{-\int p dx} \\ \mathcal{W}(x_0) &= c_1 e^{-\int_{x_0}^{x_0} p dx} = c_1 = \mathcal{W}_0 \\ \mathcal{W}(x) &= c_1 e^{-\int_{x_0}^x p dx} = \mathcal{W}_0 e^{-\int_{x_0}^x p dx}\end{aligned}$$

Таким образом, если $\mathcal{W}_0 = 0$, то $\mathcal{W}(x) = 0$ на всем отрезке $[a; b]$. Дуально, если $\mathcal{W}_0 \neq 0$, то т.к. второй множитель всегда больше нуля (это экспонента) $\mathcal{W}(x) \neq 0$.

TODO: Откуда такие границы в интегралах? ■

Замечание 2.11.8. Таким образом, чтобы узнать равен ли вронскиан нулю на отрезке, достаточно узнать его значение в одной произвольной точке этого отрезка.

2.12. Свойства решений ЛОДУ₂: линейная комбинация решений, линейная зависимость решений. Определитель Вронского. Теоремы о вронскиане.

Lm 2.12.1. Линейная комбинация решений ЛОДУ₂ также является решением.

$$\left\{ \begin{aligned} \mathcal{L}[y_1] &= 0 \\ \mathcal{L}[y_2] &= 0 \end{aligned} \right\} \implies \left\{ \begin{aligned} \mathcal{L}[y_1 + y_2] &= 0 \\ \mathcal{L}[\lambda y_1] &= 0 \quad (\forall \lambda \in \mathbb{R}) \end{aligned} \right.$$

Доказательство. Рассмотрим на примере $y = y_1 + y_2$. Подставим в исходное ДУ, раскроем и сгруппируем

$$\begin{aligned} y'' + py' + qy &= 0 \\ (y_1 + y_2)'' + p(y_1 + y_2)' + q(y_1 + y_2) &= 0 \\ (y_1'' + py_1' + qy_1) + (y_2'' + py_2' + qy_2) &= 0 \end{aligned}$$

Это верно, т.к. y_1 и y_2 это решения исходного ДУ. Случай $y = \lambda y_1$ рассматривает аналогично. ■

Следствие 2.12.2. Множество решений ЛОДУ образует линейное пространство.

Теорема 2.12.3. О существовании и единственности решения ЛОДУ₂.

$$y'' = g(x, y, y') = f(x) - py' - qy$$

Если $g, g'_y, g'_{y'}$ непрерывны в области $D \ni (x_0, y_0)$, то задача Коши

$$\begin{cases} \mathcal{L}[y] = f(x) \\ y_0 = y(x_0) \\ y'_0 = y'(x_0) \end{cases}$$

имеет единственное решение.

Доказательство. (Без доказательства) ■

2.13. Свойства решений ЛОДУ₂ : линейная комбинация решений, линейная зависимость решений. Теорема о структуре общего решения ЛОДУ₂. Фундаментальная система решений (определение).

Теорема 2.13.1. О структуре общего решения ЛОДУ₂.

Если $\mathcal{L}[y_1] = 0$, $\mathcal{L}[y_2] = 0$ и y_1, y_2 линейно независимы, то $\bar{y} = c_1 y_1 + c_2 y_2$ – общее решение ЛОДУ₂.

Доказательство. Начнем с того, что $\bar{y} = c_1 y_1 + c_2 y_2$ это решение как линейная комбинация решений (см. 2.12.1).

Рассмотрим точку (x_0, y_0) в рамках задачи Коши:

$$\begin{cases} \mathcal{L}[y] = 0 \\ y_0 = y(x_0) \\ y'_0 = y'(x_0) \end{cases} \iff \begin{cases} c_1 y_1(x_0) + c_2 y_2(x_0) = y_0 \\ c_1 y'_1(x_0) + c_2 y'_2(x_0) = y'_0 \end{cases} \iff \begin{pmatrix} y_1 & y_2 \\ y'_1 & y'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}$$

TODO: Глянуть переходы выше, в конспекте противоречиво написано

По т. Крамера решение полученной СЛАУ будет единственным только в том случае, если определитель главной матрицы не равен нулю. Это выполняется, т.к. этот определитель это вронскиан, который не равен нулю, т.к. решения линейно-независимы. ■

Def 2.13.2. Фундаментальная система решений (ФСР) ЛОДУ_n это максимальный (по включению) набор линейно независимых решений ДУ.

2.14. Свойства решений ЛНДУ₂ : теоремы о структуре общего решения и решении ДУ с суммой правых частей.

Теорема 2.14.1. Общее решение ЛНДУ₂ представимо в виде суммы общего решения соответствующего ЛОДУ₂ и некоторого частного решения ЛНДУ₂.

$$\begin{aligned} y'' + py' + qy &= f(x) \\ y &= \bar{y} + y^* \\ \mathcal{L}[\bar{y}] &= 0, \mathcal{L}[y^*] = f(x) \end{aligned}$$

Доказательство. Сначала покажем, что y будет являться решением ДУ:

$$\mathcal{L}[y] = \mathcal{L}[\bar{y}] + \mathcal{L}[y^*] = 0 + f(x) = f(x)$$

Показать, что это решение будет являться общим можно аналогично 2.13.1. ■

Lm 2.14.2. Если правая часть ЛНДУ₂ представлена суммой $f_1(x) + f_2(x)$, то частное решение этого ЛНДУ₂ будет суммой двух частных решений ЛНДУ₂, в которых правая часть является каждым из слагаемых.

$$\begin{aligned}y'' + py' + qy &= f_1(x) + f_2(x) \\ \mathcal{L}[y_1^*] &= f_1(x), \mathcal{L}[y_2^*] = f_2(x) \\ y^* &= y_1^* + y_2^*\end{aligned}$$

Доказательство.

$$\mathcal{L}[y^*] = \mathcal{L}[y_1^*] + \mathcal{L}[y_2^*] = f_1(x) + f_2(x)$$

■

2.15. Структура решения ЛОДУ_n: линейная независимость решений, нахождение фундаментальной системы решений по корням характеристического уравнения.

Замечание 2.15.1. О существовании и единственности решения задачи Коши.

Пусть

$$y^{(n)} = g(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$$

при этом y, y', g непрерывны и ограничены в области

$$\begin{aligned}|x - x_0| &< h_0, \\ |y - y_0| &< h_1, \\ &\dots \\ |y^{(n-1)} - y_0^{(n-1)}| &< h_n,\end{aligned}$$

где $(x_0, y_0, \dots, y_0^{(n-1)})$ это начальные условия. Тогда существует единственное решение задачи Коши.

TODO: Разве не все частные производные по $y, y', \dots, y^{(n-1)}$ должны бы непрерывны?

По аналогии с ЛОДУ₂ для ЛОДУ_n можно составить характеристическое уравнение:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[y] &= y^{(n)}(x) + p_1 y^{(n-1)}(x) + \dots + p_{n-1} y' + p_n y = 0 \quad p_i \in \mathbb{R} \\ \mathcal{L}[e^{kx}] &= k^n e^{kx} + p_1 \cdot k^{n-1} e^{kx} + \dots + p_n e^{kx} = 0 \quad | : e^{kx} \neq 0 \\ k^n &+ p_1 k^{n-1} + \dots + p_n = 0\end{aligned}$$

Далее аналогично рассмотрим некоторые случаи:

1. Набору $k_1, \dots, k_m \in \mathbb{R}$ различных вещественных корней соответствует набор частных линейно-независимых решений однородного уравнения $y_1 = e^{k_1 x}, \dots, y_m = e^{k_m x}$.
2. Набору $k_1 = k_2 = \dots = k_m = k \in \mathbb{R}$ повторяющихся вещественных корней соответствует набор частных линейно-независимых решений однородного уравнения $y_1 = e^{kx}, y_2 = x e^{kx}, \dots, y_m = x^{m-1} e^{kx}$.
3. Каждой уникальной паре вида $k = \alpha + i\beta$ соответствует пара частных линейно-независимых решений однородного уравнения $y_1 = e^{\alpha x} \cos \beta x$ и $y_2 = e^{\alpha x} \sin \beta x$.
4. Каждой паре кратности m вида $k = \alpha + i\beta$ соответствует m пар частных линейно-независимых решений однородного уравнения вида

$$\begin{array}{llll}y_1 &= & e^{\alpha x} \cos \beta x, & y_2 &= & e^{\alpha x} \sin \beta x \\ y_3 &= & x e^{\alpha x} \cos \beta x, & y_4 &= & x e^{\alpha x} \sin \beta x \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ y_{2m-1} &= & x^{m-1} e^{\alpha x} \cos \beta x, & y_{2m} &= & x^{m-1} e^{\alpha x} \sin \beta x\end{array}$$

Замечание 2.15.2. Общим решением ЛОДУ_n будет линейная оболочка набора частных решений, соответствующих корням характеристического уравнения.

Def 2.15.3. Вронскианом ДУ называется вронскиан его ФСР.

Замечание 2.15.4. Все доказанные свойства вронскиана распространяются и на БОльшую размерность.

TODO: Ударение меня победило

2.16. Решение ЛНУ₂ с постоянными коэффициентами: специальная правая часть, поиск частного решения методом неопределенных коэффициентов.

Def 2.16.1. Специальной правой частью называется (СПЧ)

$$f(x) = e^{\alpha x}(P_n(x) \cos \beta x + Q_m(x) \sin \beta x)$$

где α, β, n, m некоторые коэффициенты.

Поиск частного решения методом неопределенных коэффициентов

Идея: пусть в ЛНДУ_n правая часть является специальной. Можно предположить, что она была получена дифференцированием функции со схожей структурой, поэтому будем искать частное решение ЛНДУ_n в виде

$$y^* = x^r e^{\alpha x}(U_l(x) \cos \beta x + W_l(x) \sin \beta x), \quad l = \max(n, m)$$

Алгоритм:

1. Составляем и решаем характеристическое уравнение.
2. Извлекаем из СПЧ коэффициенты α, β, n, m .
3. Считаем r — количество совпадений корней характеристического уравнения с $\alpha \pm i\beta$. Совпадение комплексной пары считаем один раз.
4. Составляем y^* с неопределенными коэффициентами: полиномы U, W степени $l = \max(n, m)$.
5. Подставляем y^* в уравнение, находим неопределенные коэффициенты.

Пример #01:

$$\begin{aligned} y'' - 3y' + 2y &= 2e^{3x} \\ k^2 - 3k + 2 &= 0 \\ k_1 &= 1, k_2 = 2 \\ 2e^{3x} &\implies \alpha = 3, \beta = 0, n = 0, m = 0 \end{aligned}$$

Число $\alpha + i\beta$ не совпадает с корнями характеристического уравнения, поэтому будем искать частное решение в виде $y^* = Ae^{3x}$:

$$\begin{aligned} (Ae^{3x})'' - 3(Ae^{3x})' + 2(Ae^{3x}) &= 2e^{3x} \\ 9Ae^{3x} - 9Ae^{3x} + 2Ae^{3x} &= 2e^{3x} \mid : e^{3x} \\ 9A - 9A + 2A &= 2 \\ A &= 1 \end{aligned}$$

Итого: частное решение будет равно $y^* = e^{3x}$

Пример #02:

$$\begin{aligned} y'' - 3y' + 2y &= e^x \\ k^2 - 3k + 2 &= 0 \\ k_1 &= 1, k_2 = 2 \\ e^x &\implies \alpha = 1, \beta = 0, n = 0, m = 0 \end{aligned}$$

Корень характеристического уравнения k_1 совпал с числом $\alpha + i\beta$, поэтому будем искать частное решение в виде $y^* = Axe^x$:

$$\begin{aligned} (Axe^x)'' - 3(Axe^x)' + 2(Axe^x) &= e^x \\ e^x(2A + Ax) - 3e^x(A + Ax) + 2Axe^x &= 2e^{3x} \mid : e^x \\ 2A + Ax - 3A - 3Ax + 2Ax &= 2 \\ A &= -2 \end{aligned}$$

Итого: частное решение будет равно $y^* = -2e^x$

Замечание 2.16.2. Почему необходимо умножать на x^r ? Если этого не делать, то полученное уравнение с неопределенными коэффициентами не будет иметь решений. Это происходит в тех случаях, когда выбранное частное решение совпадает с общим решением (именно поэтому мы смотрим на корни характеристического уравнения, потому что общее решение формируется на их основе). В этих случаях нарушается структура общего решения ЛНДУ_n.

2.17. Решение ЛНУ₂ : метод вариации произвольных постоянных (Лагранжа).

Метод универсален для правой части любого вида и даже для $\mathcal{L}[y] = f(x)$ с непостоянными коэффициентами.

Рассмотрим на примере:

$$\begin{aligned}y'' - 3y' + 2y &= 2e^{3x} \\ k^2 - 3k + 2 &= 0 \\ k_1 = 1, k_2 &= 2 \\ \bar{y} &= c_1 \underbrace{e^x}_{y_1} + c_2 \underbrace{e^{2x}}_{y_2}\end{aligned}$$

Будем искать $y(x)$ в виде $y(x) = C_1(x)y_1 + C_2(x)y_2(x)$. Пусть $C_1(x) = g(x) + c_1, C_2(x) = h(x) + c_2$, тогда:

$$\begin{aligned}y(x) &= (g(x) + c_1)y_1 + (h(x) + c_2)y_2 \\ y(x) &= \underbrace{c_1 y_1 + c_2 y_2}_{\bar{y}} + \underbrace{g(x)y_1 + h(x)y_2}_{y^*}\end{aligned}$$

В нашем примере получаем, что $y^* = g(x)e^x + h(x)e^{2x}$. Заметим, что функции $g(x)$ и $h(x)$ можно представить по-разному. Подберем их так, чтобы выполнялось равенство

$$C_1'(x)y_1 + C_2'(x)y_2 = 0 \quad (\blacktriangle)$$

Вычислим производные $y'(x)$ и $y''(x)$:

$$\begin{aligned}y(x) &= y(x) = C_1(x)y_1 + C_2(x)y_2(x) \\ y'(x) &= \underbrace{C_1'(x)y_1 + C_2'(x)y_2}_{\blacktriangle \rightarrow 0} + C_1(x)y_1' + C_2(x)y_2' \\ y''(x) &= C_1'(x)y_1' + C_1(x)y_1'' + C_2'(x)y_2' + C_2(x)y_2''\end{aligned}$$

Вернемся к исходному ДУ и подставим в него все полученные равенства:

$$\begin{array}{rcll}y''(x) & = & C_1'(x)y_1' & + & C_1(x)y_1'' & + & C_2'(x)y_2' & + & C_2(x)y_2'' \\ py'(x) & = & & & pC_1(x)y_1' & & & + & pC_2(x)y_2' \\ qy(x) & = & & & qC_1(x)y_1 & & & + & qC_2(x)y_2 \\ f(x) & = & C_1'(x)y_1' & + & 0 & + & C_2'(x)y_2' & + & 0\end{array}$$

Суммы во втором и четвертом столбцах обнуляются, т.к. если вынести из них $C_1(x)$ и $C_2(x)$ соответственно, то в скобках останется ЛОДУ₂, а y_1, y_2 — его корни.

Таким образом мы получили второе условие для системы (первое условие это (\blacktriangle)) для нахождения $C_1(x)$ и $C_2(x)$. Искомая система будет иметь вид:

$$\begin{cases} C_1'(x)y_1 + C_2'(x)y_2 = 0 \\ C_1'(x)y_1' + C_2'(x)y_2' = f(x) \end{cases} \iff \begin{pmatrix} y_1 & y_2 \\ y_1' & y_2' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1'(x) \\ C_2'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f(x) \end{pmatrix}$$

Подведем итог и обобщим алгоритм решения ЛНДУ_n:

1. Решаем соответствующее ЛОДУ_n, получаем набор корней y_1, \dots, y_n .
2. Составляем СЛАУ следующего вида:

$$\begin{pmatrix} y_1 & \dots & y_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1^{(n-1)} & \dots & y_n^{(n-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1'(x) \\ \vdots \\ C_n'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ f(x) \end{pmatrix}$$

3. Решаем её и находим производные варьируемых функций. Интегрируем их (не забывая про константу).
4. Общее решение ЛНДУ_n будет иметь вид $y = C_1(x)y_1 + \dots + C_n(x)y_n$

2.18. Системы дифференциальных уравнений: определения, решение методом исключения.

Def 2.18.1. Пусть y_1, \dots, y_n — функции от x , дифференцируемые m раз. Тогда система

$$\begin{cases} f_1(x, y_1, \dots, y_n, y'_1, \dots, y'_n, \dots, y_1^{(m-1)}, \dots, y_n^{(m-1)}) = 0 \\ \dots \\ f_n(\dots) = 0 \end{cases}$$

называется системой дифференциальных уравнений (СДУ).

Def 2.18.2. СДУ называется *нормальной*, если все её уравнения разрешены относительно старшей производной и при этом правые части не содержат производных.

Def 2.18.3. Нормальная СДУ называется автономной, если функции в правой части каждого из её уравнений не зависят явно от x .

Замечание 2.18.4. С помощью введения новых переменных ДУ $y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$ можно свести к системе ДУ следующего вида

$$\begin{cases} y = y_1 \\ y' = y_2 \\ \dots \\ y^{(n-1)} = y_n \\ y^{(n)} = f(x, y_1, \dots, y_n) \end{cases}$$

где y_1, \dots, y_n — новые переменные.

Def 2.18.5. Порядком системы называется сумма порядков старших производных каждого из уравнений системы. Порядок системы равен порядку ДУ, соответствующего ей.

Решение СДУ методом исключения:

- 2.19. Системы дифференциальных уравнений: определения, решение матричным методом в случае различных вещественных собственных чисел.
- 2.20. Теория устойчивости: определение устойчивости по Ляпунову, фазовая плоскость, траектории ДУ. Примеры устойчивого и неустойчивого решения