



Механико-математический факультет

АЛГЕБРА, 1 СЕМЕСТР, 2 ПОТОК

Преподаватель:	Куликова Ольга Викторовна
Студент:	Молчанов Вячеслав
Группа:	108
Контакт:	Мой телеграм для связи

Москва
2024

Содержание

1	Система линейных уравнений	3
1.1	Матрица. Основные понятия	3
1.2	Система линейных (алгебраических) уравнений	4
1.3	Элементарные преобразования над СЛУ	5
1.4	Элементарные преобразования над матрицами	6
1.5	Решение СЛУ методом Гауса	7
2	Векторные пространства	11
2.1	Аксиомы элементов векторного пространства	11
2.2	Следствия	12
2.3	Векторные подпространства	13
2.4	Линейная зависимость системы векторов	14
2.5	Линейная оболочка множества S	17
2.6	Базис	18
3	Ранг	20
3.1	Рангом системы векторного пространства	20
3.2	Ранг матрицы	20
4	Возвращаемся к системе линейных уравнений	23
4.1	Фундаментальная система решений	24
4.2	Неоднородная СЛУ	27
5	Операции над матрицами	28
6	Линейные отображения	30
6.1	Изоморфизм	30
6.2	Линейное отображение и матрицы	32
6.3	Операции над линейными отображениями	33
6.4	Свойства операций над матрицами	36
6.5	Свойства операции транспонирования	37
6.6	О ранге и операциях над матрицами	37
7	Перестановки	39
8	Определители n-го порядка	40
8.1	Свойства определителей	41
8.2	Элементарные матрицы	45
8.3	Разложение определителя по строке	48
8.4	Определитель Вандермонда	50
8.5	О ранге	51
8.6	Правила Крамера СЛУ	54
8.7	Обратная матрица	55
9	Алгебраические структуры	57
9.1	Изоморфизм группы	60
9.2	Группа подстановок	61
9.3	Четность подстановки	65

9.4 Подгрупа	67
------------------------	----

1 Система линейных уравнений

1.1 Матрица. Основные понятия

Определение. Матрица A размера $m \times n$ это прямоугольная таблица с m строками и n столбцами

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

a_{ij} - элемент матрицы и индексы:

- i - номер строками
- j - номер столбца

$M_{m \times n}(\mathbb{R})$ - Множество всех матриц размера $m \times n$ с элементами из \mathbb{R}

Матрица $m \times 1$ называется столбцом:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{pmatrix}$$

Если $A = (a_{ij})$ - квадратная, $a_{ij} = 0 \forall i \neq j$, то A называется диагональной.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & & & 0 \\ & a_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Если A - диагональная и $a_{ii} = 1$, то A называется единичной.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & 1 \end{pmatrix}$$

Если A - квадратная, то

$$\bullet A = \begin{pmatrix} a_{11} & & \\ & \ddots & \\ & & a_{nn} \end{pmatrix} \text{ главная диагональ}$$

$$\bullet A = \begin{pmatrix} & & a_{1n} \\ & \dots & \\ a_{n1} & & \end{pmatrix} \text{ побочная диагональ}$$

Определение. Если A - размера $m \times n$, $a_{ij} = 0 \forall i, j$, то A называется нулевой.

1.2 Система линейных (алгебраических) уравнений

$$(*) \begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

где $a_{ij}, b \in \mathbb{R}$, x_1, \dots, x_n - неизвестные.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

A - матрица коэффициентов, a_{ij} называется коэффициентом СЛУ.

B - столбец свободных членов, b_j - свободный член.

Определение. Расширенная матрица $(A|B)$. Набор чисел $x_1^0, \dots, x_n^0 \in \mathbb{R}$ называется решением системы $(*)$, если подстановка этих чисел вместо неизвестных в $(*)$ дает тождество в каждом уравнении. $(x_i^0 \longleftrightarrow x)$

Решить систему - это найти все решения системы. Любое конкретное решение называется частным.

Определение. Если СЛУ имеет решение, то она называется совместной, иначе несовместной.

Определение. Совместная система, имеющая одно решение, называется определенной, иначе неопределенной (более одного решения).

1.3 Элементарные преобразования над СЛУ

1. Прибавить к одному уравнению другое уравнение, умноженное на число $\lambda \in \mathbb{R}$
2. Поменять местами два уравнения
3. Умножить уравнение на ненулевое число $\mu \in \mathbb{R}$

Утверждение. Эти преобразования обратимы.

Определение. Две системы линейных уравнений называются эквивалентными, если их множества решений совпадают.

Утверждение. Если одна СЛУ получена из другой СЛУ с помощью конечного числа элементарных преобразований, то эти системы эквивалентны.

Доказательство.

\implies $AX = B$ - исходная система, $\tilde{A}X = \tilde{B}$ преобразованная система.

Пусть z_1, \dots, z_n некоторое решение $AX = B$. Будем рассматривать $\tilde{A}X = \tilde{B}$, в ней ЭП II типа умножают строку на μ , имеем:

$$\begin{aligned} a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n &= b_i \text{ в } AX = B \\ \mu a_{i1}x_1 + \dots + \mu a_{in}x_n &= \mu b_i \text{ в } \tilde{A}X = \tilde{B} \end{aligned}$$

Выносим μ из второго уравнения:

$$\mu(a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n) = \mu b_i$$

Получаем, что z_1, \dots, z_n решение для $\tilde{A}X = \tilde{B}$. Для III типа ЭП очевидно. Теперь рассмотрим I тип, будем к i -ой строчке прибавлять j -ую к коэффициентом λ , получаем:

$$\begin{aligned} (a_{i1} + \lambda a_{j1})x_1 + \dots + (a_{in} + \lambda a_{jn})x_n &= \\ &= a_{i1}x_1 + \lambda a_{j1}x_1 + \dots + a_{in}x_n + \lambda a_{jn}x_n = \\ &= a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n + \lambda(a_{j1}x_1 + \dots + a_{jn}x_n) = b_i + \lambda b_j \end{aligned}$$

Таким образом, любое решение старой СЛУ - это и решение новой, то есть множество решений не уменьшилось. (со столбцами все тоже самое)

\Longleftarrow В обратную сторону аналогично (для доказательства эквивалентности), используя обратимость элементарных преобразований.

□

Мораль в том, что мы можем работать с расширенной матрицей $(A|B)$.

1.4 Элементарные преобразования над матрицами

Элементарные преобразования над строками:

$$A = \begin{pmatrix} \overline{a_1} \\ \overline{a_2} \\ \vdots \\ \overline{a_i} \end{pmatrix}, \text{ где } \overline{a_i} - \text{строка}$$

- ЭП1: $\overline{a_i} \rightarrow \overline{a_i} + \lambda \overline{a_i}$
- ЭП2: $\overline{a_i} \longleftrightarrow \overline{a_j}$
- ЭП3: $\overline{a_i} \rightarrow \mu \overline{a_i}, \mu \neq 0$

Определение. Лидер строки (ведущий элемент) - это 1-й ненулевой элемент слева.

Пример: $(0, 0, \underbrace{3}_{\text{лидер}}, 4, 5, 0, 0, 7)$

Определение. Матрица A размера $m \times n$ называется ступенчатой, если

1. Номера лидеров ненулевых строк строго возрастают с увеличением номера строки.
2. Все нулевые строки стоят внизу (в конце).

Теорема. Любую матрицу A размера $m \times n$ за конечное число элементарных преобразований над строками можно привести к ступенчатому виду.

Доказательство. Индукция по n :

Если A - нулевая, то A - ступенчатого вида. Если $A \neq 0$: найдем первый ненулевой столбец (начиная слева). Пусть j - номер первого ненулевого столбца. Пусть $a_{ij} \neq 0$:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & & \\ \vdots & \vdots & & \\ & & a_{ij} & \\ \vdots & \vdots & & \\ 0 & 0 & & \end{pmatrix}$$

Меняем 1-ю и i -ю строку местами и получаем, что a_{ij} стал лидером первой строки. Считаем, что сразу $a_{1j} \neq 0$:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_{ij} & * \\ \vdots & \vdots & * & * \\ & & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & 0 & \vdots & \end{pmatrix}$$

Вычитаем из каждой k -й строки, начиная со 2-ой, 1-ю строку, умноженную на число $\frac{a_{kj}}{a_{1j}}$. Получает вид:

$$\tilde{A} = \left(\begin{array}{c|ccc} a_{ij} & * & \cdots & * \\ \hline 0 & * & \cdots & * \\ \vdots & * & \cdots & * \\ 0 & * & \cdots & * \end{array} \right)$$

К правой части матрицы (без 1 столбца и 1 строки) применяем индукцию и проводим матрицу к ступенчатому виду. \square

Замечание. Этот метод называется методом Гауса.

1.5 Решение СЛУ методом Гауса

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

Элементарные преобразования над $AX = B \iff$ элементарные преобразования над $(A|B)$.

СЛУ $AX = B$ ступенчатая $\implies (A|B)$ имеет ступенчатый вид.

Утверждение. Решение СЛУ ступенчатого вида.

Пусть $AX = B$ - ступенчатая

$$(A|B) = \left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & & & & b_1 \\ & a_{22} & & & \vdots \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & a_{sn} & b_s \\ & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & b_{\tilde{s}} \end{array} \right)$$

\tilde{s} - ненулевые строки расширенной матрицы

s - число ненулевых строк

$$\tilde{s} = \begin{cases} s \\ s+1 \end{cases}$$

1 случай: $\tilde{s} \neq s$ ($\tilde{s} = s+1$)

Рассмотрим последнюю ненулевую строку:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} a_{11} & & & & b_1 \\ & a_{22} & & & \vdots \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & a_{sn} & b_s \\ 0 & \dots & \dots & 0 & b_{s+1} \end{array} \right)$$

$0x_1 + \dots + 0x_n = b_{s+1} \implies$ решение у этого уравнения нет \implies СЛУ не имеет решения, т.е. несовместна.

Далее $\tilde{s} = s$

Заметим, что $\tilde{s} = s \leq n$ (n -количество столбцов)

2 случай: $\tilde{s} = s = n$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

Такая СЛУ называется строго треугольной

Из n -го уравнения однозначно находится $x_n = \frac{b_n}{a_{nn}}$. Подставляем во все оставшиеся уравнения $x_n = \frac{b_n}{a_{nn}} \implies$ исключаем x_n . Получаем строго треугольную систему с меньшим количеством неизвестных.

Далее из (n-1)-го уравнения находим x_{n-1} и т.д. \implies СЛУ имеет единственное решение т.е. является определенной.

3 случай: $\tilde{s} < n$

$$\left(\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 0 & \underline{a_{1k_1}} & * & \cdots & \cdots & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \underline{a_{2k_2}} & * & \cdots & * & * \\ & & & & \ddots & & & \vdots \end{array} \right)$$

$a_{1k_1}, \dots, a_{sk_s}$ - лидеры;

x_{k_1}, \dots, x_{k_s} - главные неизвестные (неизвестные соответствуют лидерам)

Оставшиеся неизвестные назовем свободными.

Перекинем в правую часть СЛУ слагаемые, соответствующие свободным неизвестным \implies получаем относительно главных неизвестных строго треугольную СЛУ.

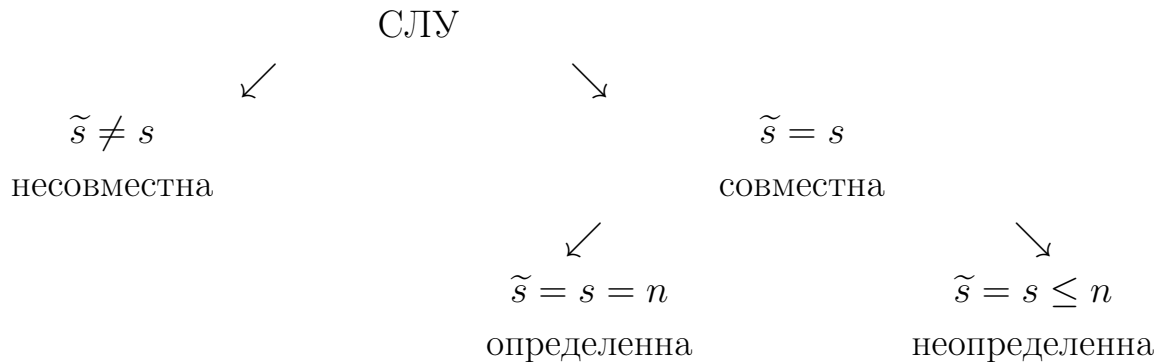
Как в случае 2 однозначно выражаются главные неизвестные через свободные \implies с точностью до нумерации получаем:

$$\begin{cases} x_1 = c_{1,s+1}x_{s+1} + \cdots + c_{1n}x_n + d_1 \\ \vdots \\ x_s = c_{s,s+1}x_{s+1} + \cdots + c_{sn}x_n + d_s \end{cases}$$

Это выражение называется общим решением системы. Подставляя вместо свободных неизвестных конкретное число из \mathbb{R} , получаем значение для главных.

\implies получаем все решения СЛУ

Если СЛУ имеет > 1 решения - такая СЛУ называется неопределенной.



Алгоритм. $AX = B \mapsto (A|B) \sim (A_c|B_c) \mapsto A_cX = B_c$

Определение. Матрица A имеет улучшенный ступенчатый вид, если выполнены следующие условия:

1. A - ступенчатого вида
2. Все лидеры равны 1
3. В каждом столбце, где есть лидер $\neq 0$, все элементы равны 0

Утверждение. Любую матрицу A можно привести к улучшенному ступенчатому виду с помощью элементарных преобразований.

Доказательство. Т.к. любую матрицу можно привести к ступенчатому виду \implies будем считать, что A - ступенчатая.

Рассмотрим последний лидер a_{sk_s} . Если $a_{sk_s} \neq 1$, то s -ю строку делим на a_{sk_s} и получаем, что $\widetilde{a_{sk_s}} = 1$.

Далее из всех строк вычитаем первую, умноженную на $a_{ik_s} \implies \widetilde{a_{ik_s}} = 0$ и т.д. \square

Определение. СЛУ $AX = B$ называется однородной, если $B = 0$, т.е. все свободные члены нулевые.

Утверждение. Однородная система всегда совместна.

Доказательство. $AX = 0$ всегда имеет решение $x_1 = 0, \dots, x_n = 0$ (тривиальное решение) \square

Следствие. Однородная СЛУ, в которой число уравнений $<$ числа неизвестных, имеет нетривиальное решение.

Доказательство. (в обозначениях из метода Гаусса)

Т.к. система совместна (т.к. $B = 0$), то $s = \widetilde{s}$

С другой стороны $s = \bar{s} \leq$ число исходных уравнений $< n \implies s = \widetilde{s} < n \implies$ СЛУ неопределенна $\implies \exists$ более одного решения $\implies \exists$ нетривиальное решение. \square

2 Векторные пространства

2.1 Аксиомы элементов векторного пространства

Мы рассматриваем векторные пространства над полем \mathbb{R} .

Определение. Векторным пространством над \mathbb{R} называют множество элементов V , на котором введены операции сложения и умножения на числа из \mathbb{R} :

1. $\forall x, y \in V \implies x + y = z \in V$
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x \in V \implies \lambda x = w \in V$

Удовлетворяет следующим свойствам:

1. $x + y = y + x$ (коммутативность)
2. $(x + y) + z = x + (y + z)$ (ассоциативность)
3. $\exists 0 \in V : \forall x \in V : x + 0 = 0 + x = x$ (нейтральный элемент относительно сложения)
4. $\forall x \in V : \exists x' : x + x' = 0$ (противоположный элемент)
5. $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x, y \in V : \lambda(x + y) = \lambda x + \lambda y$ (дистрибутивность умножения относительно сложения)
6. $\forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}, \forall x \in V : (\lambda + \mu)x = \lambda x + \mu x$ (дистрибутивность сложения относительно умножения)
7. $\forall \lambda, \mu \in \mathbb{R}, \forall x \in V : \lambda(\mu x) = (\lambda \mu)x$ (ассоциативность умножения)
8. $\forall x \in V : 1 \cdot x = x$ (нейтральный элемент относительно умножения)

Определение. Любой элемент векторного пространства называется вектором.

Примеры векторных пространств:

1. V^2 - Геометрические векторы на плоскости.
2. V^3 - Геометрические векторы в пространстве.
3. $\mathbb{R}^n = \{(a_1, \dots, a_n) | a_i \in \mathbb{R}\}$ - арифметические векторы.

$$"+": (a_1, \dots, a_n) + (b_1, \dots, b_n) = (a_1 + b_1, \dots, a_n + b_n)$$

$$"\times": (a_1, \dots, a_n) \times \lambda = (a_1 \lambda, \dots, a_n \lambda)$$

Упражнение. Проверьте, что \mathbb{R}^n (арифметическое пространство строк) с этими операциями является векторным пространством.

2.2 Следствия

1. нулевой вектор единственный

Доказательство. Пусть существует два $\bar{0}_1, \bar{0}_2 \in V$, тогда:

$$\bar{0}_2 = \bar{0}_1 + \bar{0}_2 = \bar{0}_2 + \bar{0}_1 = \bar{0}_1$$

□

2. $\forall x \in V$ противоположный вектор единственный

Доказательство. Пусть существует два x_1, x_2 - различные противоположные к вектору x , тогда:

$$\bar{0} + x_2 = (x_1 + x) + x_2 = x_1 + (x + x_2) = x_1 + \bar{0}$$

□

3. $\forall \lambda \in \mathbb{R} : \lambda \cdot \bar{0} = \bar{0}$

Доказательство.

$$\lambda \cdot \bar{0} = \lambda \cdot (\bar{0} + \bar{0}) = \lambda \cdot \bar{0} + \lambda \cdot \bar{0}$$

Прибавим к обеим частям уравнения $\lambda \cdot \bar{0} = \lambda \cdot \bar{0} + \lambda \cdot \bar{0}$ противоположный к $\lambda \cdot \bar{0}$, тогда:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \bar{0} + (-\lambda \cdot \bar{0}) &= \lambda \cdot \bar{0} + \lambda \cdot \bar{0} + (-\lambda \cdot \bar{0}) \\ \bar{0} &= \lambda \cdot \bar{0} \end{aligned}$$

□

4. $\lambda \cdot (-x) = -\lambda \cdot x$

5. $\lambda \cdot (x - y) = \lambda x - \lambda y$

6. $(-1) \cdot x = -x$

7. $(\lambda - \mu) \cdot x = \lambda x - \mu x$

2.3 Векторные подпространства

Определение. Подмножество $U \subseteq V$ называется векторным подпространством, если:

1. $x, y \in U \implies x + y \in U$
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x \in U \implies \lambda \cdot x \in U$
3. $U \neq \emptyset$

Замечание. 3 условие заменить на условие: $0 \in U$

\Leftarrow очевидно.

\implies если $U \neq \emptyset$, то $\exists x \in U \implies$ по 2. : $(-1) \cdot x \in U \implies -x \in U \implies x + (-x) \in U \implies 0 \in U$

Утверждение. Любое векторное подпространство векторного пространства V само является векторным пространством относительно операций векторного пространства V .

Доказательство. Надо проверить определение. 1 и 2 свойство из операций векторного пространства означают, что в U заданы операции сложения и умножения на вещественное число. Проверка аксиом векторного пространства: 1,2,5,6,7,8 - выполнены для всех векторов из V , а значит и для всех векторов из U .

3,4 доказательство как в замечании:

$$\forall x \in U, \exists (-x) = (-1) \cdot x \in U, \bar{0} \in U, \text{ т.к. } U \neq \emptyset$$

□

Примеры.

1. V^3, U - множество всех векторов из V^3 , параллельные фиксированной плоскости.
2. $\mathbb{R}^n, U = \{(a_1, \dots, a_n) | a_{2i} = 0\}$ - векторное подпространство
 $\tilde{U} = \{(a_1, \dots, a_n) | a_{2i} = 1\}$ - не векторное подпространство, т.к. множество не замкнуто относительно сложения и умножения.
3. В любом векторном пространстве V есть такие подпространства, состоящие только из нулевого вектора. (тривиальное или несобственное подпространство) (Остальное называется собственными)

2.4 Линейная зависимость системы векторов

V - векторное пространство над полем \mathbb{R}

Определение. Линейной комбинацией векторов $v_1, \dots, v_n \in V$ с коэффициентами $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ называется выражение вида:

$$\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n$$

Говорят, что вектора $w \in V$ линейно выражаются через (v_1, \dots, v_n) , если $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R} : w = \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n$

Определение. Линейная комбинация $\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n$ называется тривиальной, если $\lambda_1 = 0, \dots, \lambda_n = 0$. Иначе нетривиальной.

Определение. Система векторов v_1, \dots, v_n называется линейно зависимой (ЛЗ), если \exists нетривиальная линейная комбинация равная 0, (т.е. $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ не все равные 0) такая что $\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n = 0$. Иначе система называется линейно независимой (ЛНЗ), т.е. из любого такого равенства $\lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_n x_n = 0 \implies (\lambda_1, \dots, \lambda_n) = 0$.

Примеры. $V^2, v_1 = i + j, v_2 = 2i, v_3 = 3i$ -линейно зависимая система, т.к.

$$1 \cdot (i + j) + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot (3i) = 0$$

$$1 \cdot v_1 + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot v_2 + \left(-\frac{1}{3}\right) \cdot v_3 = 0$$

Свойства.

1. Система из одного вектора V_1 ЛЗ $\iff V_1 = 0$
2. Система из 2-х векторов v_1 и v_2 ЛЗ \iff они пропорциональные, т.е. $v_1 = \lambda v_2, v_2 = \mu v_1$.

Пример. \mathbb{R}^n

Система $\underbrace{(1, 0, 0, \dots, 0)}_{e_1}, \underbrace{(0, 1, 0, \dots, 0)}_{e_2}, \dots, \underbrace{(0, 0, 0, \dots, 1)}_{e_n}$ линейно независимая

$$\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_n e_n = (0, \dots, 0) \iff (\lambda_1, \dots, \lambda_n) = 0 \iff \text{ЛНЗ}$$

Лемма 1. (Критерий линейной зависимости) Система векторов $v_1, \dots, v_n \in V$, $n > 1$ - линейно зависимы \iff хотя бы один вектор линейно выражается через оставшиеся.

Доказательство.

\implies По определению ЛЗ $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ не все нулевые: $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0$. Без ограничения общности можем считать, что $\lambda_1 \neq 0$, тогда $v_1 = \frac{1}{\lambda_1}(-\lambda_2 v_2 - \dots - \lambda_n v_n)$

\Leftarrow Пусть один из этих векторов выражается через оставшиеся. Без ограничения общности можем считать, что v_1 выражается через оставшиеся

$$v_1 = \mu_2 v_2 + \dots + \mu_n v_n$$

$1 \cdot v_1 - \mu_2 v_2 - \dots - \mu_n v_n = 0$ - нетривиальная линейная комбинация,

т.к. μ_1 (коэф. перед v_1) $\neq 0 \implies v_1, \dots, v_n$ - линейно зависима.

□

Замечание. В лемме 1 нельзя «хотя бы один» заменить на «любой»!

Пусть $v_1 \neq 0, v_2 = 0$ и v_1, v_2 - ЛЗ, т.к. $0 \cdot v_1 + 1 \cdot v_2 = 0$

Лемма 2. Пусть $v_1, \dots, v_n \in V$ - ЛНЗ, тогда $w \in V$ линейно выражается через $v_1, \dots, v_n \iff (w, v_1, \dots, v_n)$ - ЛЗ.

Доказательство.

$\implies \exists \mu_1, \dots, \mu_n \in \mathbb{R} : w = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n \implies$ по критерию ЛЗ система $\{w, v_1, \dots, v_n\}$ - ЛЗ.

\Leftarrow Пусть система ЛЗ $\implies \exists \lambda_0, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ - не все нули, так что $\lambda_0 w + \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0$, тогда:

1. $\lambda_0 = 0$, то $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n = 0$ - нетривиальная линейная комбинация

2. $\lambda_0 \neq 0 \implies w = (-\frac{\lambda_1}{\lambda_0})v_1 + \dots + (-\frac{\lambda_n}{\lambda_0})v_n$

□

Лемма 3. Пусть v_1, \dots, v_k - ЛНЗ и вектор w линейно выражается через v_1, \dots, v_k . Тогда это выражение единственное.

Доказательство.

1. Пусть выражается единственно. Допустим, v_1, \dots, v_k - ЛЗ $\implies \exists \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$ не все нулевые, т.ч. $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k = 0$

Тогда если $w = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_k v_k$, то $w + 0 = (\mu_1 + \lambda_1)v_1 + \dots + (\mu_k + \lambda_k)v_k$ другое разложение, противоречие.

2. Пусть v_1, \dots, v_k - ЛНЗ. Допустим, что существует два разложения:

$$w = \mu_1 v_1 + \dots + \mu_k v_k$$

$$w = \widetilde{\mu}_1 v_1 + \dots + \widetilde{\mu}_k v_k$$

$$\mu_1 v_1 + \dots + \mu_k v_k = \widetilde{\mu}_1 v_1 + \dots + \widetilde{\mu}_k v_k$$

$$v_1(\mu_1 - \widetilde{\mu}_1) + \dots + v_k(\mu_k - \widetilde{\mu}_k) = 0$$

$\implies \{v_1, \dots, v_k\}$ - ЛЗ \implies противоречие.

□

Лемма 4.

1. Если какая-то подсистема векторов ЛЗ, то вся система ЛЗ.
2. Если система векторов ЛНЗ, то любая подсистема ЛНЗ.

Доказательство.

1. Пусть подсистема v_1, \dots, v_k системы $v_1, \dots, v_k, \dots, v_m$ - ЛЗ $\implies \exists \lambda_1, \dots, \lambda_k$ не все равные нулю, т.ч. $\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_k v_k = 0$. Положим $\lambda_{k+1} = 0, \dots, \lambda_m = 0$. Тогда $\lambda_1 v_1, \dots, \lambda_k v_k, \dots, \lambda_m v_m = 0$ - нетривиальная ЛК $\implies \{v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_m\}$ - ЛЗ.
2. Следует из 1.

□

Лемма 5. (ОЛЛЗ)

Пусть $v_1, \dots, v_k \in V, w_1, \dots, w_m \in V$, причем каждый w_i линейно выражается через v_1, \dots, v_k , тогда, если $m > k$, то $\{w_1, \dots, w_m\}$ - ЛЗ.

Доказательство. Пусть

$$\begin{cases} w_1 = c_{11}v_1 + \dots + c_{1k}v_k \\ w_2 = c_{21}v_1 + \dots + c_{2k}v_k \\ \vdots \\ w_m = c_{m1}v_1 + \dots + c_{mk}v_k \end{cases} \quad \text{где } c_{ij} \in \mathbb{R}$$

Докажем, что \exists нетривиальная ЛК $w_1, \dots, w_m = 0$

Для произвольных $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ рассмотрим выражение:

$$\begin{aligned} \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_m w_m &= \\ &= \lambda_1(c_{11}v_1 + \dots + c_{1k}v_k) + \dots + \lambda_m(c_{m1}v_1 + \dots + c_{mk}v_k) = \\ &= (\lambda_1 c_{11} + \dots + \lambda_m c_{m1})v_1 + \dots + (\lambda_1 c_{1k} + \dots + \lambda_m c_{mk})v_k \end{aligned}$$

Рассмотрим СЛУ с неизвестными $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ из k уравнений:

$$\begin{cases} c_{11}\lambda_1 + \dots + c_{m1}\lambda_m = 0 \\ \vdots \\ c_{1k}\lambda_1 + \dots + c_{mk}\lambda_m = 0 \end{cases}$$

Т.к. $m > k$ и это ОСЛУ в которой число уравнений $<$ числа неизвестных, то эта система имеет нетривиальное решение $\lambda_1, \dots, \lambda_m$

$\implies \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_m w_m = 0$ - это нетривиальная ЛК

$\implies w_1, \dots, w_m$ - ЛЗ. □

2.5 Линейная оболочка множества S

V - векторное пространство над \mathbb{R}

$S \subseteq V, S \neq \emptyset$

Утверждение. Множество всех ЛК $\lambda_1 s_1 + \dots + \lambda_k s_k$, $\lambda_i \in \mathbb{R}$, $s_i \in S$ образует векторное подпространство в пространстве V .

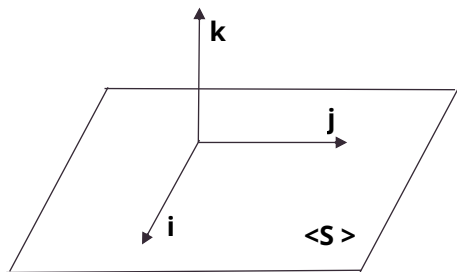
Доказательство. Д/з. □

Определение. Такое векторное подпространство называется линейная оболочка множества S , обозначается $\langle S \rangle$.

Примеры.

1. \mathbb{R}^3 , $S = \{(1, 0, 0), (0, 1, 0)\}$; $\langle S \rangle = \{(\lambda, \mu, 0) \mid \lambda, \mu \in \mathbb{R}\}$

2. V^3 , $S = \{i, j, i + j\}$



$$\tilde{S} = \{i + j\}$$

Определение. Если $V = \langle S \rangle$, то S называется порождающим множеством векторного пространства V . Говорят векторное пространство V порождается множеством S .

Определение. Если \exists конечное множество S , т.ч. $V = \langle S \rangle$, то V называется конечномерным (конечнопорожденным), иначе бесконечномерным.

Пример. $\mathbb{R}^n = \langle (1, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, 1) \rangle$

Лемма. (Переформулировка ОЛЛЗ) Пусть векторное пространство V порождается k векторами. Тогда любые $m > k$ векторов из V - ЛЗ.

2.6 Базис

V - конечномерное векторное пространство над \mathbb{R}

Определение. 1 Система векторов $\{e_1, \dots, e_n\} \subseteq V$ называется базисом векторного пространства V , если:

1. $\{e_1, \dots, e_n\}$ - ЛНЗ
2. $V = \langle e_1, \dots, e_n \rangle$, т.е. $\forall x \in V, \exists x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R} : x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$

Эти числа x_1, \dots, x_n - называются координатами вектора x в базисе $\{e_1, \dots, e_n\}$

Определение. 2 Система векторов $\{e_1, \dots, e_n\} \subseteq V$ называется базисом векторного пространства V , если любой вектор $x \in V$ выражается через $\{e_1, \dots, e_n\}$ единственным образом.

Утверждение. (Опр 1) \iff (Опр 2)

Доказательство. По лемме (3). □

Теорема. Всякое конечномерное векторное пространство над \mathbb{R} обладает базисом. Более того, из любого конечного порожденного множества можно выбрать базис.

Доказательство. Пусть S - какое-то порождающее множество векторного пространства V .

Если S - ЛНЗ, то S - базис

Если S - ЛЗ, то по критерию о ЛЗ один из векторов S_1 множества S линейно выражается через остальные.

Тогда $S_1 = S \setminus \{s_1\}$ - конечное порождающее множество. ч.т.д.

Т.к. S - конечное, это процесс прервется и мы получим ЛНЗ порожденную систему. □

Теорема. В любом базисе конечномерного векторного пространства V над \mathbb{R} одно и тоже число векторов.

Доказательство. Пусть есть два базиса $\{e_1, \dots, e_n\}$ и $\{f_1, \dots, f_m\}$ векторного пространства V . Тогда каждый вектор f_i выражается через e_1, \dots, e_n .

По ОЛЛЗ: $\{f_1, \dots, f_m\}$ - ЛЗ $\implies \{f_1, \dots, f_m\}$ - не базис \implies противоречие. □

Определение. Число векторов в базисе конечномерного векторного пространства V , называется размерностью векторного пространства и обозначается: $\dim V$

Примеры.

1. $\dim V^2 = 2$

2. $\dim \mathbb{R}^n = n$

Замечание. Если $V = 0$, то $\dim V = 0$ (базис состоит из \emptyset)

Пусть V - векторное пространство над \mathbb{R} , $\dim V = n$, $S \subseteq V$ Любые $m > n$ векторов в S - ЛЗ. (из ОЛЛЗ)

\implies в S \exists максимальная ЛНЗ подсистема (т.е. ничего нельзя добавить к этой подсистеме без нарушения ЛНЗ)

Лемма 6. Пусть V - n -мерное векторное пространство над \mathbb{R} , $S \subseteq V$. Тогда максимальная ЛНЗ система векторов из S образует базис в лин. оболочке $\langle S \rangle$

Доказательство. Пусть $\{s_1, \dots, s_k\}$ максимальная (по включению) ЛНЗ система в $S \implies \forall s \in S \setminus \{s_1, \dots, s_k\} \implies \{s, s_1, \dots, s_k\}$ - ЛЗ.

По Лемме (2). $\implies s = \lambda_1 s_1 + \dots + \lambda_k s_k$

Докажем, что $\{s_1, \dots, s_k\}$ базис в $\langle S \rangle$.

1. ЛНЗ (очевидно)

2. $\forall x \in \langle S \rangle: x = x_1 s_1 + \dots + x_k s_k$

По определению линейной оболочки x линейно выражается через вектора из S
А каждый вектор из S линейно выражается через $\{s_1, \dots, s_k\}$ □

Теорема. Пусть V конечномерное векторное пространство над \mathbb{R} , тогда:

1. Любая максимальная ЛНЗ система векторов из V - базис V .
2. Любую ЛНЗ систему векторов из V можно дополнить до базиса векторного пространства V .

Доказательство.

1. По лемме (6). $S = V$

2. Пусть S - ЛНЗ система векторов из V

Если $V = \langle S \rangle$, тогда S - базис.

Если $V \neq \langle S \rangle$, то $\exists s_1 \in V \setminus \langle S \rangle$

$\Rightarrow s_1$ линейно не выражается через $S \Rightarrow$ (По лемме 2.) $S_1 = S \cup \{s_1\}$ - ЛНЗ.

\Rightarrow Если $V = \langle S_1 \rangle$, то S_1 базис, иначе $\exists S_2 \in V \setminus \langle S_1 \rangle$, и т.д.

Этот процесс прервется на конечном шаге, т.к. пространство V - конечное. (Если $\dim V \neq n$, то \nexists ЛНЗ системы с числом векторов $> n$) \square

Следствие. Пусть V конечномерное векторное пространство над \mathbb{R}

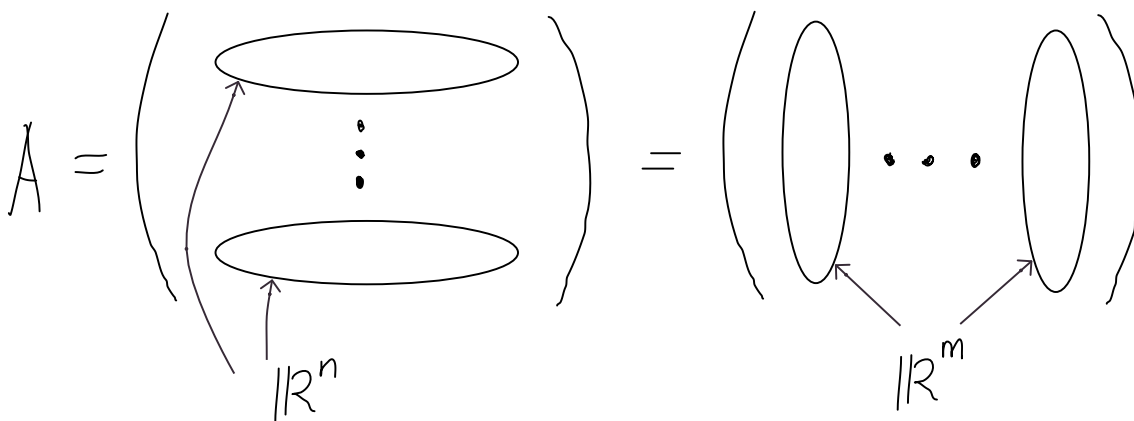
1. Любой ненулевой вектор можно дополнить до базиса.
2. Любые n ЛНЗ вектора в n -мерном пространстве V образуют базис.

3 Ранг

3.1 Рангом системы векторного пространства

Определение. Рангом системы векторов $S \subseteq V$, $\dim V < \infty$, назовем $\dim \langle S \rangle$, т.е. число векторов в максимальной ЛНЗ системы из S .

A - матрица $m \times n$



Определение. Рангом матрицы A называется ранг системы ее строк, т.е. максимальное число ЛНЗ строк матрицы.

3.2 Ранг матрицы

Определение. Ранг системы $\{s_1, \dots, s_n\}$ - векторов называется $\dim \langle s_1, \dots, s_n \rangle$.

Определение. Рангом матрица A $m \times n$ называется ранг системы её строк.

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{pmatrix}$$

Определение. Две системы векторов $\{v_1, \dots, v_n\}$ $\{w_1, \dots, w_n\}$ называются эквивалентными, если каждый вектор v_i линейно выражается через $\{w_1, \dots, w_n\}$, а w_i через $\{v_1, \dots, v_n\}$.

Это условная эквивалентность: $\langle v_1, \dots, v_n \rangle = \langle w_1, \dots, w_n \rangle$

Утверждение. При элементарных преобразованиях над строками, ранг матрицы A не изменяется.

Доказательство.

$$A = \left(\begin{array}{c} \text{---} A_1 \text{---} \\ \vdots \\ \text{---} A_m \text{---} \end{array} \right) \xrightarrow{\text{ЭП над строками}} \tilde{A} = \left(\begin{array}{c} \text{---} \tilde{A}_1 \text{---} \\ \vdots \\ \text{---} \tilde{A}_m \text{---} \end{array} \right)$$

$$\langle A_1, \dots, A_m \rangle = \langle \tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_m \rangle$$

т.е. система строк A эквивалентна системе строк $\tilde{A} \implies rk A = rk \tilde{A}$. □

Утверждение. При элементарных преобразованиях над столбцами, ранг матрицы A не изменяется.

Предложение 1.

Ранг матрицы A равен числу ненулевых строк матрицы ступенчатого вида, к которому можно привести матрицу A с помощью элементарных преобразований строк.

Доказательство. $A \xrightarrow{\text{ЭП строк}} A_{\text{ст}} \implies rk A = rk A_{\text{ст}}$

$$A_{\text{ст}} = \left(\begin{array}{cccc} a_{1i_1} & & & * \\ & a_{2i_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & a_{si_s} \end{array} \right) \quad a_{1i_1}, \dots, a_{si_s} - \text{лидеры строк в } A_{\text{ст}} \implies a_{1i_1} \neq 0, \dots, a_{si_s} \neq 0$$

Очевидно, что $rk A_{\text{ст}} \leq s$. Достаточно доказать, что ненулевые строки ЛНЗ.

Рассмотрим ЛК:

$$\lambda_1(0, \dots, 0, a_{1i_1}, *, \dots, *) + \lambda_2(0, \dots, 0, a_{2i_2}, *, \dots, *) + \dots + \lambda_s(0, \dots, 0, a_{si_s}, *, \dots, *) = (0, \dots, 0)$$

$$(0, \dots, 0, \lambda_1 a_{1i_1}, \dots, \lambda_1 a_{1i_2} + \lambda_2 a_{2i_2}, \dots) = (0, \dots, 0) \implies \lambda_1 \underbrace{a_{1i_1}}_{\text{лидер}} = 0 \implies \lambda_1 = 0$$

$$\lambda_1 a_{1i_2} + \lambda_2 \underbrace{a_{2i_2}}_{\text{лидер}} = 0 \implies \lambda_2 = 0 \text{ и т.д.}$$

Получаем, что $\lambda_1 = 0, \dots, \lambda_s = 0 \implies$ это ЛК - ЛНЗ. □

Предложение 2. Ранг системы столбцов не изменяется при элементарных преобразованиях над строками.

Доказательство.

$$A \xrightarrow{\text{ЭП строк}} \tilde{A}$$

$$\text{Пусть } A = (a_{ij}) = \underbrace{(A_1, \dots, A_n)}_{\text{столбцы } A}, \tilde{A} = (\tilde{a}_{ij}) = \underbrace{(\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n)}_{\text{столбцы } \tilde{A}}.$$

Докажем, что если для некоторого числа $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ выполнено:

$\lambda_1 A_1 + \dots + \lambda_n A_n = 0$, то для этих же чисел $\lambda_1 \tilde{A}_1 + \dots + \lambda_n \tilde{A}_n = 0$ (Верно и обратное, т.к. ЭП обратимы, т.е. если для каких-то чисел $\lambda_i \in \mathbb{R} : \sum \lambda_i \tilde{A}_i = 0$, то $\sum \lambda_i A_i = 0$).

$$\text{Дано: } \lambda_1 A_1 + \dots + \lambda_n A_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{12} + \dots + \lambda_n a_{1n} = 0 \\ \vdots \\ \lambda_1 a_{m1} + \lambda_2 a_{m2} + \dots + \lambda_n a_{mn} = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – решение ОСЛУ $AX = 0$. Т.к. при ЭП над уравнениями множество решений не меняется, поэтому $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – это решение ОСЛУ $\tilde{A}X = 0 \Rightarrow \lambda_1 \tilde{A}_1 + \dots + \lambda_n \tilde{A}_n = 0$

Отсюда получаем, что если A_{i_1}, \dots, A_{i_s} – максимальная ЛНЗ система столбцов в A , то $\tilde{A}_{i_1}, \dots, \tilde{A}_{i_s}$ – максимальная ЛНЗ система столбцов в $\tilde{A} \Rightarrow rk\{\tilde{A}_{i_1}, \dots, \tilde{A}_{i_s}\} = rk\{A_{i_1}, \dots, A_{i_s}\}$. \square

Определение. Пусть $A = (a_{ij})$ – матрица $m \times n$, тогда $B = (b_{ij})$ матрица $n \times m$ называется транспонированной к матрице A , если $b_{ij} = a_{ji}$, где $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$. Обозначаем $B = A^T$

Пример.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{pmatrix}$$

Следствие. Ранг системы строк матрицы A (=рангу матрицы A) не изменяется при элементарных преобразованиях над столбцами.

Доказательство. Предложение 2 применяем к A^T \square

Теорема 1. Ранг системы строк матрицы A совпадает с рангом системы столбцов матрицы A .

Доказательство. Было доказанно, что ранг системы строк (столбцов) матрицы не изменяется при ЭП над строками и над столбцами. Приведем матрицу A к ступенчатому виду с помощью ЭП над строками. $A_{\text{ст}}$ имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \boxed{a_{1i_1}} & & & * \\ & \boxed{a_{2i_2}} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \boxed{a_{si_s}} \end{pmatrix}$$

$$a_{1i_1} \neq 0, \dots, a_{si_s} \neq 0$$

Используем i_1 -столбец, вычитая этот столбец из оставшихся с подходящими коэффициентами, получаем:

$$\begin{pmatrix} \boxed{a_{1i_1}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & \boxed{a_{2i_2}} & & * & \\ & & \ddots & & \\ 0 & & & & \boxed{a_{si_s}} \end{pmatrix}$$

Далее используем i_2 -столбец, обнуляем все элементы правее $a_{i_2 2}$. В итоге получаем:

$$\begin{pmatrix} a_{1i_1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & a_{si_s} \end{pmatrix}$$

Очев, что у такой матрицы ранг системы строк = рангу системы столбцов. \square

4 Возвращаемся к системе линейных уравнений

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \quad (AX = B)$$

Теорема. (Кронекера-Капелли)

1. (Критерий совместимости СЛУ)

$$\text{СЛУ } AX = B \text{ совместна} \iff rk(A|B) = rkA$$

2. (Критерий определенности СЛУ)

$$\text{Совместная СЛУ } AX = B \text{ - определена} \iff rk(A|B) = rkA = n$$

3. (Критерий существования нетривиального решения у однородной СЛУ)
ОСЛУ $AX = 0$ имеет нетривиальное решение $\iff rkA < n$

Однородная СЛУ

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = 0 \end{cases} \quad (AX = 0)$$

Утверждение. ОСЛУ всегда совместна, т.к. есть тривиальное решение.

Свойства.

1. Если $X^0 = \begin{pmatrix} x_1^0 \\ \vdots \\ x_n^0 \end{pmatrix}$; $\widetilde{X}^0 = \begin{pmatrix} \widetilde{x}_1^0 \\ \vdots \\ \widetilde{x}_n^0 \end{pmatrix}$ - решение ОСЛУ,
тогда $X^0 + \widetilde{X}^0 = \begin{pmatrix} X_1^0 + \widetilde{X}_1^0 \\ \vdots \\ X_n^0 + \widetilde{X}_n^0 \end{pmatrix}$
2. Если $X^0 = \begin{pmatrix} x_1^0 \\ \vdots \\ x_n^0 \end{pmatrix}$ - решение ОСЛУ $AX = 0$, то $\lambda X^0 = \begin{pmatrix} \lambda x_1^0 \\ \vdots \\ \lambda x_n^0 \end{pmatrix}$ - решение.

Доказательство. Д/з □

Следствие. Множество всех решений ОСЛУ является векторным подпространством в \mathbb{R}^n . Будем говорить, что это пространство над ОСЛУ.

Замечание. Если \exists нетривиальное решение ОСЛУ над \mathbb{R} , то \exists бесконечно много решений.

Теорема 2. Пространство решений ОСЛУ $AX = 0$ имеет базис из $n - r$ векторов, где n - число неизвестных, а $r = rkA$.

4.1 Фундаментальная система решений

Определение. Любой базис пространства решений ОСЛУ называется Фундаментальной Системой Решений ОСЛУ (ФСР).

Доказательство. (Теоремы 2.)

Решение СЛУ методом Гаусса: приводим её к ступенчатому виду (число ступенек $r = rkA$), главные неизвестные выражаем через свободные.

$$\begin{cases} x_1 = c_{1,1}x_{r+1} + \dots + c_{1,n-r}x_n \\ \vdots \\ x_r = c_{r,1}x_{r+1} + \dots + c_{r,n-r}x_n \end{cases}$$

Определим $n - r$ частных решений приравнявая одно из x_1, \dots, x_n к 1, а остальные к 0.

$$F_1 = \begin{pmatrix} c_{11} \\ \vdots \\ c_{r1} \\ \hline 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F_2 = \begin{pmatrix} c_{12} \\ \vdots \\ c_{r2} \\ \hline 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \quad F_{n-r} = \begin{pmatrix} c_{1,n-r} \\ \vdots \\ c_{r,n-r} \\ \hline 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

Докажем, что F_1, \dots, F_{n-r} - базис пространства решений ОСЛУ

1. F_1, \dots, F_{n-r} - ЛНЗ?

$$\text{Рассмотрим ЛК } \lambda_1 F_1 + \dots + \lambda_{n-r} F_{n-r} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} * \\ \vdots \\ * \\ \hline \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_{n-r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \lambda_1 = 0, \dots, \lambda_{n-r} = 0$$

2. Надо доказать, что любое решение выражено через F_1, \dots, F_{n-r}

$$X^0 = \begin{pmatrix} c_{11} \\ \vdots \\ c_{r1} \\ \hline \mu_{r+1} \\ \vdots \\ \mu_n \end{pmatrix} = \mu_{r+1} F_1 + \dots + \mu_n F_{n-r}$$

□

Пример. Найти ФСР ОСЛУ

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + 3x_3 + 5x_4 - x_5 = 0 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & -1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & -1 \\ 0 & 1 & -2 & -4 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 5 & 9 & -3 \\ 0 & 1 & -2 & -4 & 2 \end{pmatrix}$$

где x_1, x_2 - главные, x_3, x_4, x_5 - свободные

$$\begin{cases} x_1 = -5x_3 - 9x_4 + 3x_5 \\ x_2 = 2x_3 + 4x_4 - 2x_5 \end{cases} \quad x_3, x_4, x_5 \in \mathbb{R} - \text{произвольные}$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} -5 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F_2 = \begin{pmatrix} -9 \\ 4 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad F_3 = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \text{три частных решения ОСЛУ}$$

Проверим, что $\{F_1, F_2, F_3\}$ - базис пространства решений ОСЛУ

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \lambda_3 F_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \implies \lambda_{1,2,3} = 0 \implies F_1, F_2, F_3 - \text{ЛНЗ.}$$

Проверим, что $\{F_1, F_2, F_3\}$ порождает пространство решений. Возьмем произвольные числа μ_3, μ_4, μ_5 и приравняем $x_3 = \mu_3, x_4 = \mu_4, x_5 = \mu_5$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5\mu_3 - 9\mu_4 + 3\mu_5 \\ 2\mu_3 + 4\mu_4 - 2\mu_5 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \end{pmatrix} = \mu_3 \begin{pmatrix} -5 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu_4 \begin{pmatrix} -9 \\ 4 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \mu_5 \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Такой базис называется нормальный ФСР.

4.2 Неоднородная СЛУ

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \quad (AX = B)$$

Рассмотрим соответствующую (ассоциированную) к ней ОСЛУ

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = 0 \end{cases} \quad (AX = 0)$$

Теорема. Пусть СЛУ $AX = B$ - совместна. X_0 - произвольное частное решение. Тогда множество M всех решений неоднородной СЛУ: $AX = B$ равно сумме частного решения X_0 и множеству $M_{\text{одн}}$ всех решений соответствующей однородной СЛУ: $AX = 0$

$$M = X_0 + M_{\text{одн}} = \{X_0 + Y | Y \in M_{\text{одн}}\}$$

Доказательство. $X_0 + M_{\text{одн}} \subseteq M$

Рассмотрим произвольное решение ОСЛУ. $Y \in M_{\text{одн}}$

$$\text{Пусть } X_0 = \begin{pmatrix} x_1^0 \\ \vdots \\ x_n^0 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

$$\text{Докажем, что } X_0 + Y = \begin{pmatrix} x_1^0 + y_1 \\ \vdots \\ x_n^0 + y_n \end{pmatrix} - \text{решение СЛУ, т.е. } X_0 + Y \in M$$

$$AX = B : a_{i1}x_1^0 + \dots + a_{in}x_n^0 = b_i$$

$$AX = 0 : a_{i1}y_1 + \dots + a_{in}y_n = 0$$

где $i = \overline{1, m}$.

Проверим, что $X_0 + Y \in M$

$$\begin{aligned} a_{i1}(x_1^0 + y_1) + \dots + a_{in}(x_n^0 + y_n) &= b_i \\ \underbrace{(a_{i1}x_1^0 + \dots + a_{in}x_n^0)}_{b_i \text{ (т.к. } X_0 \in M)} + \underbrace{(a_{i1}y_1 + \dots + a_{in}y_n)}_{0 \text{ (т.к. } Y \in M_{\text{одн}})} &= b_i \end{aligned}$$

Обратное утверждение: $M \subseteq X_0 + M_{\text{одн}}$

Рассмотрим произвольное решение $Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}$ - неоднородная СЛУ.

Докажем, что $Z - X_0 = \begin{pmatrix} z_1 - x_1^0 \\ \vdots \\ z_n - x_n^0 \end{pmatrix}$ - решение однородной СЛУ.

Проверяем

$$\begin{aligned} a_{i1}(z_1 - x_1^0) + \dots + a_{in}(z_n - x_n^0) &= 0 \\ \underbrace{(a_{i1}z_1 + \dots + a_{in}z_n)}_{b_i(\text{т.к. } Z \in M)} - \underbrace{(a_{i1}x_1^0 + \dots + a_{in}x_n^0)}_{b_i(\text{т.к. } X_0 \in M)} &= 0 \end{aligned}$$

□

Замечание.

Общее решение ОСЛУ имеет вид:

$$X = \mu_1 F_1 + \dots + \mu_s F_s$$

где F_1, \dots, F_s - ФСР ОСЛУ, $s = n - rkA$

Общее решение неоднородной СЛУ:

$$X = X_0 + \mu_1 F_1 + \dots + \mu_s F_s$$

X_0 - частное решение неоднородной СЛУ

5 Операции над матрицами

$Mat_{m \times n}(\mathbb{R})$ - множество всех матриц размера $m \times n$ с коэффициентами из \mathbb{R}

$A, B \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}), A = (a_{ij}), B = (b_{ij})$

1. Сложение матриц

Суммой матриц A и B называется матрица $C = (c_{ij})$ размера $m \times n$, у которой $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$. Обозначается: $C = A + B$

2. Умножение матриц на число $\lambda \in \mathbb{R}$

Произведение матрицы $A = (a_{ij})$ на λ называется матрица $C = (c_{ij})$ размера $m \times n$, у которой $c_{ij} = \lambda a_{ij}$. Обозначается: $C = \lambda A$

Утверждение. Множество $Mat_{m \times n}(\mathbb{R})$ относительно этих операций сложения и умножения на число, образует векторное пространство над \mathbb{R} .

Доказательство. $A, B \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}) \implies A + B, \lambda A \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R})$

Надо проверить 8 аксиом

1) коммутативность

$$C = A + B \quad c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$$

$$\widetilde{C} = B + A \quad \widetilde{c}_{ij} = b_{ij} + a_{ij}$$

т.к. сложение вещественных чисел из \mathbb{R} - коммутативно, то $c_{ij} = \widetilde{c}_{ij} \implies$

$$C = \widetilde{C}$$

$$\implies A + B = B + A$$

Упражнение. Аналогично доказать 2), 5)-8)

3) $\exists 0 \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}) \forall A \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}) : 0 + A = A$

В качестве 0 берем нулевую матрицу размера $m \times n$

4) $\forall A \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}) \exists B \in Mat_{m \times n}(\mathbb{R}) : A + B = 0$

В качестве B берем $b_{ij} = -a_{ij}$

□

Утверждение. $\dim M_{m \times n} = m \cdot n$

Доказательство. Достаточно указать базис

$$\{E_{st}\}, s = \overline{1, m}, t = \overline{1, n}$$

$$E_{st} = (a_{ij}), a_{ij} = \begin{cases} 1, & i = s, j = t \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Упражнение. Проверить, что это базис.

□

Определение. Матрица E_{st} называется матричной единицей. Базис из всех матричных единиц называется стандартным базисом в пространстве $Mat_{m \times n}(\mathbb{R})$. $A = \sum a_{st} E_{st}$

3. Умножение матриц

$$A \in Mat_{m \times k}(\mathbb{R}), B \in Mat_{k \times n}(\mathbb{R})$$

Произведение матрицы A на матрицу B называется матрица C размера

$$m \times n, \text{ у которой } c_{ij} = \sum_{s=1}^k a_{is} b_{sj}. \text{ Обозначаем } C = AB.$$

Свойство. Произведение матриц не коммутативно.

Пример.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$AB = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad BA = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \implies AB \neq BA$$

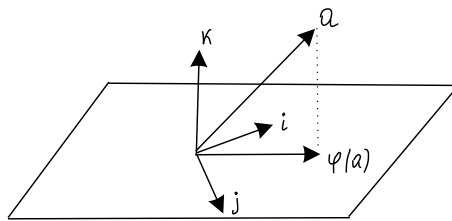
Замечание.

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \iff \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Примеры.

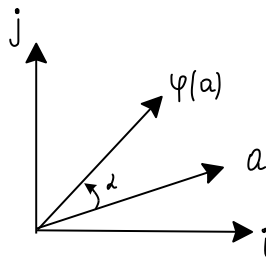
1. Проекция

$$\varphi : V^3 \rightarrow V^2, \varphi : x_1i + x_2j + x_3k \rightarrow x_1i + x_2j$$



2. Поворот

$$\varphi : V^2 \rightarrow V^2 \text{ Поворот на угол } \alpha \text{ вокруг точки } O$$



6 Линейные отображения

6.1 Изоморфизм

V, W - векторные пространства над \mathbb{R}

Определение. Отображение $\varphi : V \rightarrow W$ называется изоморфизмом векторных пространств, если:

1. $\forall a, b \in V : \varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b)$
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R} \forall a \in V : \varphi(\lambda a) = \lambda \varphi(a)$
3. φ является биекцией.

При этом V, W называется изоморфными. Обозначается $V \cong W$

Утверждение. Любое векторное пространство над \mathbb{R} размерности n изоморфно \mathbb{R}^n .

Доказательство. Фиксируем базис $\{e_1, \dots, e_n\}$ - в V .

1. $\forall x \in V$ однозначно раскладывается по базису $x = \sum_{i=1}^n x_i e_i$. Зададим отображение $\varphi : V \rightarrow \mathbb{R}^n$ по правилу:

$$\varphi : x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \rightarrow (x_1, \dots, x_n)$$

Т.к. координаты вектора определены однозначно, то φ инъективно, сюръективность очевидна $\implies \varphi$ - биекция.

2. $\forall x, y \in V$

$$x = \sum_{i=1}^n x_i e_i \quad y = \sum_{i=1}^n y_i e_i \quad x + y = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i) e_i$$

$$\varphi(x + y) = (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n) = (x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) = \varphi(x) + \varphi(y)$$

3. $\forall \lambda \in \mathbb{R} \forall x \in V$

$$\varphi(\lambda x) = \varphi\left(\sum_{i=1}^n \lambda x_i e_i\right) = (\lambda x_1, \dots, \lambda x_n) = \lambda(x_1, \dots, x_n) = \lambda \varphi(x)$$

□

Примеры.

1. $V^2 \cong \mathbb{R}^2$
 $V^3 \cong \mathbb{R}^3$
2. $M_{m \times n}(\mathbb{R}) \cong \mathbb{R}^{mn}$

Упражнение. $V \cong W \iff \dim V = \dim W$; V, W - конечномерные пространства над \mathbb{R} .

6.2 Линейные отображение и матрицы

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

1. $\forall a, b \in V \quad \varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b)$
2. $\forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall a \in V \quad \varphi(\lambda a) = \lambda \varphi(a)$

Утверждение. V, W - векторные пространства над \mathbb{R} .

Если $\{e_1, \dots, e_n\}$ - базис V , (w_1, \dots, w_n) - набор векторов из W .

Тогда $\exists!$ линейное отображение $\varphi : V \rightarrow W$, которое $\varphi : e_i \rightarrow w_i \quad \forall i = \overline{1, n}$.

Доказательство.

1. Пусть $\varphi : V \rightarrow W$ - линейное отображение такое, что $\varphi(e_i) = w_i \quad \forall i = \overline{1, n}$. Тогда образ вектора x определяется однозначно по формуле:

$$\varphi(x) = \varphi(x_1 e_1 + \dots + x_n e_n) = x_1 \varphi(e_1) + \dots + x_n \varphi(e_n) = x_1 w_1 + \dots + x_n w_n$$

где $x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n$

\implies линейное отображение определяется однозначно.

2. Докажем, что \exists линейное отображение, которое переводит e_i в w_i . Отображение зададим формулой:

$$\varphi : x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \rightarrow x_1 w_1 + \dots + x_n w_n$$

$$\varphi(a + b) = \varphi((a_1 + b_1)e_1 + \dots + (a_n + b_n)e_n) = (a_1 + b_1)w_1 + \dots + (a_n + b_n)w_n$$

$$\varphi(a) + \varphi(b) = \varphi(a_1 e_1 + \dots + a_n e_n) + \varphi(b_1 e_1 + \dots + b_n e_n) =$$

$$= a_1 w_1 + \dots + a_n w_n + b_1 w_1 + \dots + b_n w_n = w_1(a_1 + b_1) + \dots + w_n(a_n + b_n)$$

$$\implies \varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b)$$

Проверить, что $\varphi(\lambda a) = \lambda \varphi(a)$ - ДЗ

□

Пусть $\varphi : V \rightarrow W$ - линейное отображение V - n -мерное, W - m -мерное пространство.

Фиксируем базис $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис в V ; $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_m\}$ - базис в W

$$\varphi(e_1) = w_1 = a_{11}f_1 + \dots + a_{m1}f_m$$

\vdots

$$\varphi(e_n) = w_n = a_{1n}f_1 + \dots + a_{mn}f_m$$

Определение. Матрица A размера $m \times n$, составленная из столбцов координат образов векторов e_i в образе \mathcal{F} , называется матрицей линейного отображения в базисах \mathcal{E} и \mathcal{F}

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \underbrace{a_{m1} \cdots a_{mn}}_{\varphi(e_1)} & & \underbrace{\phantom{a_{m1} \cdots a_{mn}}}_{\varphi(e_n)} \end{pmatrix}$$

Утверждение. Пусть $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис в V над \mathbb{R} ; $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_m\}$ - базис в W над \mathbb{R} . Тогда:

- Каждому линейному отображению $\varphi : V \rightarrow W$ однозначно соответствуют матрица размера $m \times n$ этого линейного отображения в базисах \mathcal{E} и \mathcal{F} .
- Любой матрицы A размера $m \times n$ однозначно соответствует линейное отображение $\varphi : V \rightarrow W$, для которого A - матрица этого линейного отображения в \mathcal{E}, \mathcal{F} .

6.3 Операции над линейными отображениями

Пусть V, W - векторные пространства над \mathbb{R}

1) Сложение линейных отображений.

$$\varphi_1 : V \rightarrow W \quad \varphi_2 : V \rightarrow W \text{ - два линейных отображения}$$

Зададим отображение по правилу

$$(\varphi_1 + \varphi_2)(x) = \varphi_1(x) + \varphi_2(x) \quad \forall x \in V$$

Утверждение. Отображение $\varphi_1 + \varphi_2 : V \rightarrow W$ является линейным отображением.

Доказательство. $\forall a, b \in V$:

$$\begin{aligned} (\varphi_1 + \varphi_2)(a + b) &= \varphi_1(a + b) + \varphi_2(a + b) = \\ &= \varphi_1(a) + \varphi_1(b) + \varphi_2(a) + \varphi_2(b) = (\varphi_1 + \varphi_2)(a) + (\varphi_1 + \varphi_2)(b) \end{aligned}$$

Аналогично для $(\varphi_1 + \varphi_2)(\lambda a) = \lambda(\varphi_1 + \varphi_2)(a)$

□

Фиксируем базисы $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$ - в V и $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_n\}$ - в W

A_1 - матрица линейного отображения φ_1 относительно \mathcal{E} и \mathcal{F} .

A_2 - матрица линейного отображения φ_2 относительно \mathcal{E} и \mathcal{F} .

B - матрица линейного отображения $\varphi_1 + \varphi_2$ относительно \mathcal{E} и \mathcal{F} .

Утверждение. $B = A_1 + A_2$

Доказательство. Размеры совпадают

$$\varphi_1(e_i) = a_{1i}f_1 + \dots + a_{mi}f_m$$

$$\varphi_2(e_i) = \widetilde{a}_{1i}f_1 + \dots + \widetilde{a}_{mi}f_m$$

$$(\varphi_1 + \varphi_2)(e_i) = b_{1i}f_1 + \dots + b_{mi}f_m$$

$$\begin{aligned} (\varphi_1 + \varphi_2)(e_i) &= \varphi_1(e_i) + \varphi_2(e_i) = (a_{1i}f_1 + \dots + a_{mi}f_m) + (\widetilde{a}_{1i}f_1 + \dots + \widetilde{a}_{mi}f_m) = \\ &= (a_{1i} + \widetilde{a}_{1i})f_1 + \dots + (a_{mi} + \widetilde{a}_{mi})f_m \end{aligned}$$

Т.к. разложение по базису единственное, то

$$b_{1i} = a_{1i} + \widetilde{a}_{1i}, \dots, b_{mi} = a_{mi} + \widetilde{a}_{mi} \implies b_{ij} = a_{ij} + \widetilde{a}_{ij} \implies B = A_1 + A_2$$

□

2) Умножение линейного отображения на число.

$\varphi : V \rightarrow W$ - линейное отображение, $\mu \in \mathbb{R}$ - произвольное число.

Зададим отображение по правилу: $(\mu\varphi)(x) = \mu\varphi(x) \quad \forall x \in V$

Утверждение. Отображение $\mu\varphi : V \rightarrow W$ является линейным (Упражнение)

Доказательство. Аналогично.

□

Пусть $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис в V и $\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_n\}$ - базис в W .

A - матрица линейного отображения φ относительно \mathcal{E} и \mathcal{F} .

B - матрица линейного отображения $\mu\varphi$ относительно \mathcal{E} и \mathcal{F} .

Утверждение. $B = \mu A$

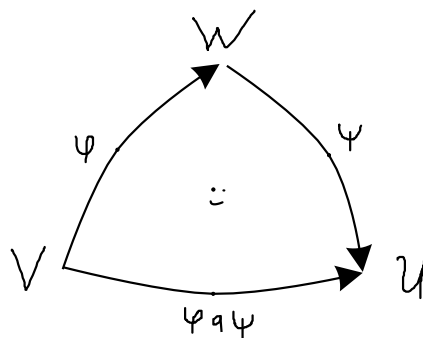
Доказательство. Видимо дз(

□

3) Композиция (произведение) линейных отображений.

Пусть V, W, U - векторные пространства над \mathbb{R}

$$\varphi : V \rightarrow W \quad \psi : W \rightarrow U$$



Зададим отображение по правилу:

$$(\psi \circ \varphi)(x) = \psi(\varphi(x)) \quad \forall x \in V$$

Утверждение. Отображение $\psi \circ \varphi : V \rightarrow U$ является линейным.

Доказательство. $\forall a, b \in V$

1. $(\psi \circ \varphi)(a + b) = \psi(\varphi(a + b)) = \psi(\varphi(a) + \varphi(b)) = \psi(\varphi(a)) + \psi(\varphi(b))$
2. Аналогично для $(\psi \circ \varphi)(\lambda a) = \lambda(\psi \circ \varphi)(a)$

□

Фиксируем базис: $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_n\}$ - базис в V

$\mathcal{F} = \{f_1, \dots, f_m\}$ - базис в W

$\mathcal{G} = \{g_1, \dots, g_k\}$ - базис в U

A - матрица линейного отображения φ относительно \mathcal{E}, \mathcal{F} .

B - матрица линейного отображения ψ относительно \mathcal{F}, \mathcal{G} .

C - матрица линейного отображения $\psi \circ \varphi$ относительно \mathcal{E}, \mathcal{G} .

Утверждение. $C = B \cdot A$

Доказательство.

$$\varphi(e_i) = \sum_{s=1}^m a_{si} f_s; \quad \psi(f_s) = \sum_{t=1}^k b_{ts} g_t$$

По определению матрицы линейного отображения:

$$(\psi \circ \varphi)(e_i) = \sum_{l=1}^k c_{li} g_l \quad (*)$$

По определению композиции:

$$\begin{aligned} (\psi \circ \varphi)(e_i) &= \psi(\varphi(e_i)) = \psi\left(\sum_{s=1}^m a_{si} f_s\right) = \sum_{s=1}^m a_{si} \psi(f_s) = \\ &= \sum_{s=1}^m a_{si} \left(\sum_{t=1}^k b_{ts} g_t\right) = \sum_{t=1}^k \left(\sum_{s=1}^m b_{ts} a_{si}\right) g_t \quad (\star) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow (*) = (\star).$$

Т.к. координаты определены однозначно $\Rightarrow c_{it} = \sum_{s=1}^m b_{ts} a_{si} \Rightarrow C = B \cdot C \quad \square$

6.4 Свойства операций над матрицами

Предположим, что все размеры матриц согласованы.

1. $M_{m \times n}(\mathbb{R})$ - векторное пространство над \mathbb{R}
2. Ассоциативность $A(BC) = (AB)C$

Доказательство. $A_{m \times k}, B_{k \times n}, C_{n \times l}$

Пусть $D_{m \times l} = A(BC)$, $\tilde{D}_{m \times l} = (AB)C$. Надо проверить, что $\forall i, j : [D]_{ij} = [\tilde{D}]_{ij}$.

$$\begin{aligned} [D]_{ij} &= [A(BC)]_{ij} = \sum_{s=1}^k [A]_{is} \cdot [BC]_{si} = \sum_{s=1}^k [A]_{is} \left(\sum_{t=1}^n [B]_{st} \cdot [C]_{ti}\right) = \\ &= \sum_{s=1}^k \sum_{t=1}^n [A]_{is} ([B]_{st} \cdot [C]_{ti}) \\ [\tilde{D}]_{ij} &= [(AB)C]_{ij} = \sum_{t=1}^n [AB]_{it} [C]_{tj} = \sum_{t=1}^n \left(\sum_{s=1}^k [A]_{is} \cdot [B]_{st}\right) [C]_{tj} = \\ &= \sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^k ([A]_{is} \cdot [B]_{st}) \cdot [C]_{tj} \end{aligned}$$

По свойствам операций над \mathbb{R} , результаты преобразований равны. \square

3. $A(B + C) = AB + AC$
4. $(B + C)A = BA + CA$
5. $\lambda(AB) = (\lambda A)B = A(\lambda B); \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$

6. $\forall A \in M_{m \times n}(\mathbb{R}), \exists$ единичная матрица $E \in M_{m \times m}(\mathbb{R}) : EA = A$
7. $\forall A \in M_{m \times n}(\mathbb{R}) : 0 \cdot A = 0$
8. Нет коммутативности: $AB \neq BA$ даже если размеры согласованы

Доказательство. Свойства 3. - 7. упражнение) □

6.5 Свойства операции транспонирования

1. $(A^T)^T = A$
2. $(\lambda A)^T = \lambda A^T$
3. $(A + B)^T = A^T + B^T$
4. $(AB)^T = B^T A^T$

Доказательство. 4. $A_{m \times k}, B_{k \times n} \implies B^T_{n \times k}, A^T_{k \times m}$ (размеры совпадают)

Проверим равенство $D = (AB)^T$ и $\tilde{D} = B^T A^T$.

$$[D]_{ij} = [(AB)^T]_{ij} = [(AB)]_{ji} = \sum_{s=1}^k [A]_{js} [B]_{si}$$

$$[\tilde{D}]_{ij} = B^T A^T = \sum_{s=1}^k [B]_{is} [A]_{sj} = \sum_{s=1}^k [A]_{js} [B]_{si}$$

□

6.6 О ранге и операциях над матрицами

Теорема.

1. $rk A^T = rk A$
2. $rk(\lambda A) = \begin{cases} rk A, & \text{если } \lambda \neq 0 \\ 0, & \text{если } \lambda = 0 \end{cases}$
3. $rk(A + B) \leq rk A + rk B$
4. $rk(AB) \leq \min\{rk A, rk B\}$

Доказательство.

1. Следует из того, что ранг системы строк = рангу системы столбцов, и из определения ранга матрицы.

2. Очев.

3. Пусть $\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}$ - строки матрицы A . $\overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}$ - строки матрицы B .
 $\overline{a_1} + \overline{b_1}, \dots, \overline{a_m} + \overline{b_m}$ - строки матрицы $A + B$.

$$rkA = \dim\langle\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}\rangle, \quad rkB = \dim\langle\overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}\rangle$$

$$rk(A + B) = \dim\langle\overline{a_1} + \overline{b_1}, \dots, \overline{a_m} + \overline{b_m}\rangle$$

Заметим, что $(\langle\overline{a_1} + \overline{b_1}, \dots, \overline{a_m} + \overline{b_m}\rangle) \subseteq (\langle\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}, \overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}\rangle)$

Лемма. Пусть V векторное пространство над \mathbb{R} $\dim V = n$

U - произвольное подпространство в V . Тогда $\dim U \leq n$

Более того, если $U \neq V$, то $\dim U < n$.

Доказательство. Пусть $\{e_1, \dots, e_m\}$ - базис $U \subseteq V$, т.е. $\dim U = m$

ЛНЗ система $\{e_1, \dots, e_m\}$ можно дополнить до базиса в $V \implies m \leq n$

Если $m = n$, то $\{e_1, \dots, e_m\}$ - базис $V \implies V = U$ □

Применяем лемму и получаем, что

$$\dim\langle\overline{a_1} + \overline{b_1}, \dots, \overline{a_m} + \overline{b_m}\rangle \leq \dim\langle\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}, \overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}\rangle$$

Т.к. объединение базисов линейной оболочки $\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}$ и $\overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}$ является конечной порождающей системой линейной оболочки $\langle\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}, \overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}\rangle$, а из любой конечной порождающей системы можно выбрать базис, значит:

$$\dim\langle\overline{a_1} + \overline{b_1}, \dots, \overline{a_m} + \overline{b_m}\rangle \leq \dim\langle\overline{a_1}, \dots, \overline{a_m}\rangle + \dim\langle\overline{b_1}, \dots, \overline{b_m}\rangle$$

$$\implies rk(A + B) \leq rkA + rkB$$

4. Докажем, что $rkAB \leq rkA$. Пусть $C = AB$, $A_{m \times k}$, $B_{k \times n}$

A_1, \dots, A_n - столбцы матрицы A

B_1, \dots, B_n - столбцы матрицы B

C_1, \dots, C_n - столбцы матрицы C

$$C_1 = AB_1 = A_1b_{11} + \dots + A_kb_{k1}$$

$$C_2 = AB_2 = A_1b_{12} + \dots + A_kb_{k2}$$

⋮

$$C_n = AB_n = A_1b_{1n} + \dots + A_kb_{kn}$$

$$\Rightarrow \langle C_1, \dots, C_n \rangle \subseteq \langle A_1, \dots, A_k \rangle \Rightarrow \dim \langle C_1, \dots, C_n \rangle \leq \dim \langle A_1, \dots, A_k \rangle \Rightarrow rkC \leq rkA.$$

Докажем, что $rkAB \leq rkB$.

$$rk(AB) = rk(AB)^T = rk(B^T A^T) \leq rkB^T = rkB$$

□

7 Перестановки

Определение. Упорядоченная последовательность (k_1, \dots, k_n) чисел $1, 2, \dots, n$ расположенных в некотором порядке называется перестановкой из n элементов.

Пример. $(3, 1, 2)$ перестановка из 3-х элементов.

Определение. Перестановка $(1, 2, \dots, n)$ называется тривиальной.

Определение. Говорят, что пара элементов k_i и k_j образуют инверсию, если $i < j$, то $k_i > k_j$.

Определение. Перестановка называется четной (нечетной), если число инверсий в ней четное (нечетное).

Знак переставки $sgn(k_1, \dots, k_n) = (-1)^s$, где s - число инверсий в перестановке.

Определение. Перемена двух элементов в перестановке называется транспозицией этих элементов.

Утверждение. При транспозиции любых двух элементов четность меняется на противоположную.

Доказательство.

1. Транспозиция двух соседних элементов.

При этом изменяется расположение только этих элементов относительно других \Rightarrow количество инверсий изменился на 1 \Rightarrow четность поменяется.

2. Общий случай:

$$(\dots, k_i, \dots, k_j, \dots) \rightarrow (\dots, k_j, \dots, k_i, \dots)$$

Пусть между k_i и k_j (s) элементов.

Перемену k_i и k_j произведем за $2s + 1$ транспозиций соседних элементов.

Сначала k_i переставим последовательно с каждым из элементов, стоящих

между k_i и k_j (это s транспозиций), потом k_i переставим с k_j , затем k_j поставим на i позицию (это еще s транспозиций).

Т.к. транспозиция соседних элементов меняет четность, то за $2s + 1$ транспозиций четность изменится.

□

Следствие. Пусть $n > 1$. Тогда число четных перестановок из n элементов равно числу нечетных.

Доказательство. Перечислим все четные перестановки и в каждой поменяем местами первые 2 элемента. При этом получим различные нечетные перестановки \Rightarrow число четных перестановок \leq числа нечетных. Аналогично в обратную сторону.

\Rightarrow число четных = число нечетных.

□

Утверждение. Число перестановок из n элементов равно $n!$

Доказательство. (k_1, \dots, k_n) для k_1 вариантов - n

Пусть выбрали $k_1 \Rightarrow$ для k_2 вариантов - $n - 1$ и т.д. Получаем всего вариантов: $n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 1 = n!$

□

8 Определители n-го порядка

Определение. Определителем квадратной матрицы $A = (a_{ij})$ порядка n называется число, которое вычисляется по формуле:

$$|A| = \det A = \sum_{(k_1, \dots, k_n)} \text{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{1k_1} a_{2k_2} \dots a_{nk_n}$$

Где $\sum_{(k_1, \dots, k_n)}$ - сумма по всем перестановкам из n элементов. Эта формула называется формулой полного разложения или полного разворачивания определителя.

Пример.

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \text{sgn}(1, 2) a_{11} a_{22} + \text{sgn}(2, 1) a_{12} a_{21} = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$$

$$A_{n \times n} = \begin{pmatrix} \overline{a_1} \\ \overline{a_2} \\ \vdots \\ \overline{a_n} \end{pmatrix}$$

Пусть $\overline{a_1}, \overline{a_2}, \dots, \overline{a_n}$ - строки матрицы A . Тогда определитель можно рассматривать как функцию от строк $\det A = \det(\overline{a_1}, \overline{a_2}, \dots, \overline{a_n})$

Определение. Функция $f(v_1, \dots, v_n)$, которая векторам v_1, \dots, v_n в векторном пространстве V над \mathbb{R} ставит в соответствие число из \mathbb{R} , то есть $f : V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{R}$ называется полилинейной, если она линейна по каждому аргументу, т.е. для каждого $i = \overline{1, n}$ выполнено:

$$1. f(v_1, \dots, v_i + \tilde{v}_i, \dots, v_n) = f(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n) + f(v_1, \dots, \tilde{v}_i, \dots, v_n), \\ \forall v_i, \tilde{v}_i \in V.$$

$$2. f(v_1, \dots, \lambda v_i, \dots, v_n) = \lambda f(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n), \forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall v_i \in V.$$

Определение. Полилинейная функция $f : V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{R}$ называется кососимметричной, если при перестановке любых двух аргументов значение функции умножается на (-1) . Кососимметричная функция с двумя одинаковыми аргументами равна нулю.

Пример. Если f - кососимметричная функция и $v_1 = v_2$, то $f(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) = -f(v_2, v_1, v_3, \dots, v_n) = a \implies a = -a \implies a = 0$.

8.1 Свойства определителей

Теорема 1. Определитель n -го порядка является кососимметричной полилинейной функцией от строк матрицы.

Доказательство.

$$A = \begin{pmatrix} \overline{a_1} \\ \overline{a_2} \\ \vdots \\ \overline{a_n} \end{pmatrix} = (a_{ij}), \quad \overline{a_i} = (a_{i1}, \dots, a_{in})$$

$$\det A = \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_n}) = \sum_{(k_1, \dots, k_n)} \text{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{1k_1} \dots a_{nk_n}$$

Докажем, что $\det A$ линеен по i -му аргументу.

$$\det A = \sum_{k=1}^n a_{ik} u_k$$

где u_k - число не зависящее от элементов строки $\overline{a_i}$

$$1. \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i} + \overline{a_i}', \dots, \overline{a_n}) = \sum_{k=1}^n (a_{ik} + a_{ik}') u_k = \sum_{k=1}^n a_{ik} u_k + \sum_{k=1}^n a_{ik}' u_k = \\ = \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_n}) + \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}', \dots, \overline{a_n})$$

$$2. \det(\overline{a_1}, \dots, \lambda \overline{a_i}, \dots, \overline{a_n}) = \sum_{k=1}^n (\lambda a_{ik}) u_k = \lambda \sum_{k=1}^n a_{ik} u_k = \lambda \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_n})$$

Теперь докажем кососимметричность:

$$\begin{aligned} \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_n}) &= \\ &= \sum_{(k_1 \dots k_i \dots k_j \dots k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{1k_1} \dots a_{jk_i} \dots a_{ik_j} \dots a_{nk_n} = \\ &= \sum_{(k_1 \dots k_i \dots k_j \dots k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{1k_1} \dots a_{ik_j} \dots a_{jk_i} \dots a_{nk_n} = \\ &= - \sum_{(k_1 \dots k_i \dots k_j \dots k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{1k_1} \dots a_{ik_i} \dots a_{jk_j} \dots a_{nk_n} = \\ &= - \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_n}) \end{aligned}$$

□

Теорема 2. Пусть $f(A) = f(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_n})$ - функция от строк, $A \in M_n(\mathbb{R})$ такие, что:

1. $f(E) = 1$
2. f - Полилинейная
3. f - Кососимметричная

тогда $f(A) = \det A$.

Доказательство. $e_1 = (1, 0, \dots, 0), \dots, e_n = (0, \dots, 0, 1)$ - строки единичной матрицы

$$E = \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \{e_1, \dots, e_n\} - \text{базис в векторном пространстве } \mathbb{R}^n$$

$$\Rightarrow \overline{a_i} = (a_{i1}, \dots, a_{in}) = a_{i1}e_1 + \dots + a_{in}e_n$$

$$\Rightarrow f(A) = f(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_n}) = f\left(\sum_{k_1=1}^n a_{1k_1} e_{k_1}, \dots, \sum_{k_n=1}^n a_{nk_n} e_{k_n}\right) =$$

$$= \sum_{k_1=1}^n \dots \sum_{k_n=1}^n a_{1k_1} \cdot \dots \cdot a_{nk_n} \cdot f(e_{k_1}, \dots, e_{k_n}) =$$

$$= \sum_{(k_1, \dots, k_n)} f(e_{k_1}, \dots, e_{k_n}) \cdot a_{1k_1} \cdot \dots \cdot a_{nk_n}$$

Осталось доказать, что $f(e_{k_1}, \dots, e_{k_n}) = \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n)$.

Т.к. $f(E) = 1$, то $f(A) = f(e_1, e_2, \dots, e_n) = \operatorname{sgn}(1, 2, \dots, n)(*)$

Меняя любые два аргумента местами, f меняет знак, т.к. f кососимметрична. С другой стороны, меняя два любые числа перестановки местами, знак перестановки sgn тоже меняет знак.

Любую перестановку можно получить из тривиальной за конечное число транспозиций.

Т.к. $(*)$ верно, то, делая последовательно транспозицию в перестановке, и такую же переменную аргументов у функции f , получим $f(e_{k_1}, \dots, e_{k_n}) = \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n)$. \square

Следствие.

1. Если в квадратной матрице A одна из строк равна линейной комбинации остальных, то $\det A = 0$
2. Если к строке квадратной матрицы A применить ЭП1 (т.е. к строке прибавить другую, умноженную на число), то определитель не изменится.

Доказательство.

$$\begin{aligned} 2) \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i} + \lambda \overline{a_j}, \dots, \overline{a_n}) &= \\ &= \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_n}) + \lambda \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_n}) = \\ &= \det(\overline{a_1}, \dots, \overline{a_i}, \dots, \overline{a_j}, \dots, \overline{a_n}) \end{aligned}$$

\square

Определение. Квадратная матрица $A = (a_{ij})$ называется (верхней) треугольной матрицей, если $a_{ij} = 0$ при $i > j$.

Пример.
$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Можно проследить, как влияют ЭП на определитель:

- ЭП1 $\overline{a_i} \rightarrow \overline{a_i} + \lambda \overline{a_j}$ \det не изменится.
- ЭП2 $\overline{a_i} \rightarrow \overline{a_j}$ \det умножается на -1.
- ЭП3 $\overline{a_i} \rightarrow \mu \overline{a_i}, \mu \neq 0$ \det умножится на μ .

Утверждение. Определитель верхней треугольной матрицы равен произведению диагональных элементов.

$$\text{Доказательство.} \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} \cdot a_{22} \cdot \dots \cdot a_{nn}$$

Рассмотрим любую не тождественную перестановку (k_1, \dots, k_n) , где $k_i \neq i$. Тогда найдется такой множитель $(i > j)$ $a_{ij} = 0$, \implies это слагаемое обнулится. \implies Во всей сумме останется только тождественная перестановка. \square

Теорема 3. Определитель при транспонировании не изменяется: $\det A = \det A^T$

Доказательство. Пусть $B = A^T$, $a = (a_{ij})$, $B = (b_{ij})$

$$\det A = \sum_{(l_1, \dots, l_n)} \operatorname{sgn}(l_1, \dots, l_n) a_{1l_1}, \dots, a_{nl_n}$$

$$\begin{aligned} \det A^T = \det B &= \sum_{(k_1, \dots, k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) b_{1k_1}, \dots, b_{nk_n} = \\ &= \sum_{(k_1, \dots, k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) a_{k_1 1}, \dots, a_{k_n n} = \\ &= \sum_{(k_1, \dots, k_n)} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) \operatorname{sgn}(1, 2, \dots, n) a_{k_1 1}, \dots, a_{k_n n} = (*) \end{aligned}$$

Переставим a_{ij} , переупорядочив номера строк, т.е. первые индексы по возрастанию последовательно, меняя два множителя местами:

$$a_{k_1 1}, \dots, \underbrace{a_{k_i i}, \dots, a_{k_j j}}_{\text{меняем}}, \dots, a_{k_n n}$$

При этом перемене двух множителей местами меняется местами и первые индексы и вторые. При этом:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_i, \dots, k_j, \dots, k_n) \cdot \operatorname{sgn}(1, \dots, i, \dots, j, \dots, n) &= \\ = (-1)^2 \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_j, \dots, k_i, \dots, k_n) \cdot \operatorname{sgn}(1, \dots, j, \dots, i, \dots, n) \end{aligned}$$

$$(*) = \sum_{(l_1, \dots, l_n)} \operatorname{sgn}(1, 2, \dots, n) \operatorname{sgn}(l_1, \dots, l_n) a_{1l_1}, \dots, a_{nl_n} = \det A \quad \square$$

Следствие. Определитель матрицы есть кососимметричная и полилинейная функция столбцов матрицы.

Все свойства определителя, которые верны для строк матрицы, верны и для столбцов.

8.2 Элементарные матрицы

Определение. Матрица, полученная из единичной матрицы E , с помощью одного элементарного преобразования над строками или столбцами, называется элементарной матрицей.

ЭП1: $\bar{a}_i \rightarrow \bar{a}_i + \lambda \bar{a}_j, \quad i \neq j$

$$\begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

ЭП2: $\bar{a}_i \leftrightarrow \bar{a}_j, \quad i \neq j$

$$\begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

ЭП3: $\bar{a}_i \leftrightarrow \mu \bar{a}_i, \quad \mu \neq 0$

$$\begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

Лемма 1.

1.1 Любые ЭП над строками матрицы A равносильно умножению матрицы A слева на элементарную матрицу, т.е.

$$A \rightsquigarrow \tilde{A} \iff \tilde{A} = T \cdot A \text{ где } T - \text{элементарная матрица, такая что } E \rightsquigarrow T$$

1.2 Любые ЭП над столбцами матрицы A равносильно умножению матрицы A справа на элементарную матрицу.

Доказательство. Непосредственная проверка □

Лемма 2. Пусть A - квадратная матрица порядка n , тогда:

1. Если $\det A \neq 0$, то с помощью ЭП над строками, A можно привести к E .
2. Если $\det A = 0$, то с помощью ЭП над строками, в A можно получить нулевую строку

Доказательство. Методом Гаусса любую матрицу можно привести к ступенчатому виду. Ступенчатый вид для квадратной матрицы является верхнетреугольной, т.е.:

$$A \rightsquigarrow \tilde{A} = \begin{pmatrix} \widetilde{a_{11}} & & * \\ & \ddots & \\ 0 & & \widetilde{a_{nn}} \end{pmatrix}$$

$$\implies \det A = \xi \cdot \det \tilde{A}, \text{ где } \xi \neq 0, \det \tilde{A} = \widetilde{a_{11}} \cdot \dots \cdot \widetilde{a_{nn}}$$

Итак,

$$\det A = 0 \iff \det \tilde{A} = 0 \iff \widetilde{a_{11}} \cdot \dots \cdot \widetilde{a_{nn}} = 0$$

1. Если $\det A \neq 0$, то $a_{11} \neq 0, \dots, a_{nn} \neq 0$ - лидеры матрицы A
 $\implies \tilde{A}$ приводится к улучшенному ступенчатому виду обратными ходом Гаусса и этот улучшенный ступенчатый вид совпадает с E
2. Если $\det A = 0$, то $a_{11} \cdot \dots \cdot a_{nn} = 0 \implies \exists k : a_{kk} = 0$. По определению ступенчатого вида $\forall i > k : \widetilde{a_{ii}} = 0 \implies \widetilde{a_{nn}} = 0 \implies$ последняя строка в \tilde{A} нулевая.

□

Теорема 4. Пусть A, B - квадратные матрицы порядка n , тогда:

$$\det AB = \det A \cdot \det B$$

Доказательство. Из ассоциативности умножения $T(AB) = (TA)B$, где T элементарная матрица, получаем, что элементарное преобразование над строками матрицы A соответствует элементарному преобразованию строк матрицы AB .

1 случай. $\det A = 0$ (по лемме (1), пункт 2) $\implies A \rightsquigarrow \tilde{A}$ (с нулевой строкой)
 $\implies \tilde{A} = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k) \cdot A$, где T_i - матрицы элементарных преобразований.
 $\implies (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)(AB) = ((T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A)B = \tilde{A}B \implies \det AB = 0$, т.к. $AB \rightsquigarrow \tilde{A}B$

2 случай. $\det A \neq 0$ (по лемме (1), пункт 1) $\implies A \rightsquigarrow E \implies E = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A$, где T_i - матрицы элементарных преобразований.

$$(T_1 \cdot \dots \cdot T_k)(AB) = ((T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A)B = EB = B$$

$$\implies \det AB = c \cdot \det((T_1 \cdot \dots \cdot T_k)AB) = c \cdot \det B$$

Рассмотрим отношение:

$$\frac{\det AB}{\det A} = (*)$$

Произведем над матрицей A ЭП, которые приведут матрицу $A \rightsquigarrow E$, одновременно производим такие же ЭП над AB .

$$(*) = \frac{\det EB}{\det E} = \det B$$

□

Теорема 5. (Об определителе с углом нулей)

Пусть A - квадратная матрица порядка k

B - квадратная матрица порядка m

C - матрица размера $k \times m$.

Тогда:

$$\det \left(\begin{array}{c|c} A & C \\ \hline 0 & B \end{array} \right) (*) = \det A \cdot \det B$$

Доказательство.

1 случай. $\det B = 0$

(По лемме (2), пункт 2) $B \rightsquigarrow \tilde{B}$ Производя точно такие же ЭП над последними m строками матрицы $(*)$, получаем нулевую строку

$$\implies \det \left(\begin{array}{c|c} A & C \\ \hline 0 & B \end{array} \right) = \det A \cdot \det B = 0$$

2 случай. $\det A = 0$ Аналогично как в 1 случае, только ЭП над столбцами.

3 случай. $\det A \neq 0, \det B \neq 0$

Рассмотрим отношение:

$$\frac{\det \left(\begin{array}{c|c} A & C \\ \hline 0 & B \end{array} \right)}{\det A \cdot \det B}$$

(По лемме (2), пункт 1) $A \rightsquigarrow E, B \rightsquigarrow E$

Преобразуем матрицу A с помощью ЭП над столбцами, которые приводят $A \rightsquigarrow E$, преобразуем B с помощью ЭП над строками, которые приводят $B \rightsquigarrow E$. Одновременно преобразуем матрицу $(*)$ с помощью таких же ЭП над строками и столбцами, отношение при этом не изменится.

Тогда:

$$\frac{\det \left(\begin{array}{c|c} A & C \\ \hline 0 & B \end{array} \right)}{\det A \cdot \det B} = \frac{\det \left(\begin{array}{c|c} E & C \\ \hline 0 & E \end{array} \right)}{\det E \cdot \det E} = 1$$

□

8.3 Разложение определителя по строке

A - матрица размера $m \times n$.

i_1, \dots, i_k - номера некоторого разложения строк в A .

j_1, \dots, j_t - номера некоторого разложения столбцов в A .

Определение. Матрица, состоящая из элементов матрицы A , стоящих на пересечении строк с номерами i_1, \dots, i_k и столбцов с номерами j_1, \dots, j_t , называется подматрицей матрицы A

$$i_1 \quad \cdots \quad i_s$$

Обозначение: $A :$

$$j_1 \quad \cdots \quad j_t$$

Определение. Минорами k -ого порядка матрицы A называется определитель квадратной подматрицы порядка k .

Пример.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 7 & 8 & 7 \end{pmatrix} \Rightarrow \text{Минор} = \begin{vmatrix} 6 & 8 \\ 7 & 7 \end{vmatrix}$$

Пусть A квадратная матрица порядка n

Определение. Минор порядка $(n - 1)$ квадратной матрицы A , порядка n , полученный вычеркиванием i -ой строки и j -ого столбца, называется дополнительным минором к элементу a_{ij} .

Обозначается: M_{ij}

Пример.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \Rightarrow M_{12} = \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 8 & 9 \end{vmatrix} = -6$$

Определение. Алгебраическое дополнение к элементу a_{ij} - это число:

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot M_{ij}$$

Пример. (к прошлому примеру) $A_{21} = (-1)^{2+1}(-6) = 6$

Лемма. Матрица \bar{A} , полученная из A заменой i -ой строки на $(0, \dots, 0, a_{ij}, 0, \dots, 0)$:

$$\det \bar{A} = \det \begin{pmatrix} \vdots & & & & \\ 0 & \cdots & a_{ij} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \end{pmatrix} = a_{ij} \cdot A_{ij}$$

8.4 Определитель Вандермонда

Определение. $V(x_1, \dots, x_n)$ - определитель Вандермонда.

$$V(x_1, \dots, x_n) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \dots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^{n-1} & x_2^{n-1} & x_3^{n-1} & \dots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j)$$

Вычисление индукции по n

База: $n = 2 : \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ x_1 & x_2 \end{vmatrix} = x_2 - x_1$

Пусть верно для $(n - 1)$, тогда вычислим для n :

$$\begin{aligned} V(x_1, \dots, x_n) &\stackrel{(1)}{=} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & \dots & x_n - x_1 \\ 0 & x_2^2 - x_1x_2 & x_3^2 - x_1x_3 & \dots & x_n^2 - x_1x_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & x_2^{n-1} - x_1x_2^{n-2} & x_3^{n-1} - x_1x_3^{n-2} & \dots & x_n^{n-1} - x_1x_n^{n-2} \end{vmatrix} \stackrel{(2)}{=} \\ &\stackrel{(2)}{=} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & \dots & x_n - x_1 \\ x_2^2 - x_1x_2 & x_3^2 - x_1x_3 & \dots & x_n^2 - x_1x_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_2^{n-1} - x_1x_2^{n-2} & x_3^{n-1} - x_1x_3^{n-2} & \dots & x_n^{n-1} - x_1x_n^{n-2} \end{vmatrix} \stackrel{(3)}{=} \\ &\stackrel{(3)}{=} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & \dots & x_n - x_1 \\ x_2(x_2 - x_1) & x_3(x_3 - x_1) & \dots & x_n(x_n - x_1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_2^{n-2}(x_2 - x_1) & x_3^{n-2}(x_3 - x_1) & \dots & x_n^{n-2}(x_n - x_1) \end{vmatrix} = \\ &= \prod_{i=2}^n (x_i - x_1) \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_2^{n-2} & x_3^{n-2} & \dots & x_n^{n-2} \end{vmatrix} = \\ &= \prod_{i=2}^n (x_i - x_1) \prod_{2 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j) \end{aligned}$$

- (1) Из каждой строки, начиная с последней, вычитаем предыдущую умноженную на x_1
- (2) По теореме об определителе нулей
- (3) Выносим $(x_j - x_1)$

Следствие. (О фальшивом разложении определителя)

Пусть $A = (a_{ij})$ - квадратная матрица порядка n , тогда:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} A_{kj} = 0 \text{ (при } i \neq k) (*)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} A_{ik} = 0 \text{ (при } j \neq k)$$

(*) - Т.е. алгебраическое дополнение берем из другой строки

Доказательство. Для строк (для столбцов аналогично)

$$A = \begin{pmatrix} \overline{a_1} \\ \overline{a_2} \\ \vdots \\ \overline{a_n} \end{pmatrix}$$

Рассмотрим матрицу B , где вместо k -ой строки стоит i -ая.

$$\det B = \begin{vmatrix} \overline{a_1} \\ \vdots \\ \overline{a_i} \\ \vdots \\ \overline{a_i} \\ \vdots \\ \overline{a_n} \end{vmatrix} = 0 \text{ (т.к. совпадающие строки)}$$

С другой стороны, разложим $\det B$ по k -ой строке:

$$B = (b_{ij}), \det B = \sum_{j=1}^n b_{kj} B_{kj} = \sum_{j=1}^n a_{ij} A_{kj}$$

□

8.5 О ранге

Определение. Квадратная матрица A порядка n называется невырожденной, если $rk A = n$ (т.е. её строки ЛНЗ, как и все столбцы)

Теорема 7. Квадратная матрица A является невырожденной $\iff \det A \neq 0$

Доказательство. Пусть $A = (a_{ij})$ - квадратная матрица порядка n

Надо доказать, что $rk A = n \iff \det A \neq 0$

$\Leftarrow \det A \neq 0 \implies$ (по лемме (2), пункт 1) $A \sim E \implies rk A = rk E = n$

$\implies rk = n$. Допустим, что $\det A = 0 \implies$ (по лемме (2), пункт 2) $A \sim \tilde{A}$, где \tilde{A} матрица с нулевой строкой $\implies rk A = rk \tilde{A} < n$. Противоречие $\implies \det A \neq 0$

□

Следствие.

- Все строки квадратной матрицы A ЛНЗ $\iff \det A \neq 0$
- Все столбцы квадратной матрицы A ЛНЗ $\iff \det A \neq 0$

Теорема. (О ранге матрицы)

Ранг матрицы A совпадает с максимальным порядком отличного от нуля минора.

Доказательство. Пусть $rk A = r$

- Докажем, что все миноры порядка s , где $s > r$ равны нулю.
Рассмотрим произвольный минор M порядка s :

$$M = \det \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_s \\ \vdots & & \vdots \\ j_1 & \cdots & j_s \end{pmatrix}$$

т.к. $s > r$, то строки матрицы A с номерами i_1, \dots, i_s ЛЗ \implies строки, образующие минор ЛЗ $\implies M = 0$

- Докажем, что \exists хотя бы один ненулевой минор \tilde{M} порядка r .
Т.к. $rk A = r$, то $\exists r$ ЛНЗ строк $\implies rk B = r \implies$ в $B \exists r$ ЛНЗ столбцов.
Сформируем матрицу C из этих столбцов $\implies \det C \neq 0$
 $\det C$ это и есть искомый минор \tilde{M}

□

Определение. Пусть $M = \det A \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_s \\ \vdots & & \vdots \\ j_1 & \cdots & j_s \end{pmatrix}$ - минор порядка s

$i \notin \{i_1, \dots, i_s\}, j \notin \{j_1, \dots, j_s\}$

$$\widetilde{M} = \det A \begin{matrix} i_1 & \cdots & i_s & i \\ \vdots & & & \vdots \end{matrix} \text{ - минор порядка } s+1$$

$$\widetilde{M} \begin{matrix} j_1 & \cdots & j_s & j \end{matrix} \text{ - окаймляющий минор.}$$

Пример.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & -1 & 0 & 7 \end{pmatrix}$$

$$M = \det A \begin{matrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{matrix} = \begin{vmatrix} 2 & 4 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 6$$

$$\widetilde{M} = \det A \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 4 \end{matrix} = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 6 & 7 & 8 \\ 1 & 3 & 5 \end{vmatrix} = 0$$

Метод окаймляющих миноров:

$$\begin{array}{ccc} & & \exists M_1 \neq 0? \\ & \text{да} \swarrow & \searrow \text{нет} \\ & \exists M_2 \neq 0? & rk A = 0 \\ & \text{да} \swarrow & \searrow \text{нет} \\ & \exists M_3 \neq 0? & rk A = 1 \\ \text{да} \swarrow & & \searrow \text{нет} \\ \dots & & \dots \end{array}$$

Утверждение. Пусть $A = (a_{ij})$ матрица размера $m \times n$, \exists минор M порядка r , отличный от нуля и все миноры, окаймляющие его, равны нулю.

Тогда $rk A = r$

$$\text{Доказательство. Пусть } M = \det A \begin{matrix} i_1 & \cdots & i_r \\ \vdots & & \vdots \end{matrix} \text{ Т.к. } M \neq 0, \text{ то строки матрицы}$$

$$\begin{matrix} j_1 & \cdots & j_r \end{matrix}$$

A с номерами i_1, \dots, i_r ЛНЗ $\implies rk A \geq r$

Предположим, что $rk A \geq r+1$. Т.е. \exists ЛНЗ строка (или больше). Рассмотрим строки $\overline{a_{i_1}}, \dots, \overline{a_{i_r}}$, которые формируют минор M . Они ЛНЗ.

Т.к. $rk A \geq r+1$, то $\exists i \notin \{i_1, \dots, i_r\}$: не выражаются линейно через

$\overline{a_{i_1}}, \dots, \overline{a_{i_r}} \implies \overline{a_{i_1}}, \dots, \overline{a_{i_r}}$ - ЛНЗ.

Образуем из этих строк матрицу $B \implies rkB = r + 1 \implies \exists r + 1$ ЛНЗ столбец. Столбцы с номерами j_1, \dots, j_r ЛНЗ, т.к. $M \neq 0$

Т.к. $rkB = r + 1$, то $\exists j \notin \{j_1, \dots, j_r\}$: столбец с номером j не выражается через столбцы с номерами j_1, \dots, j_r

Рассмотрим подматрицу C матрицы B , составленную из столбцов с номерами $j_1, \dots, j_r, j \implies C$ - квадратная матрица порядка $r + 1$ из ЛНЗ столбцов $\implies \det C \neq 0$

\implies т.к. $\det C$ является окаймляющим минора M , то получаем противоречие условию $\implies rkA = r$. \square

8.6 Правила Крамера СЛУ

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n = b_n \end{cases} \quad \text{Матричная форма } AX = B$$

СЛУ называется квадратной, если $m = n$

Пусть СЛУ $AX = B$ - квадратная.

Обозначение: $\Delta = \det A = \det(A_1, \dots, A_n)$

$\Delta_i = \det(A_1, \dots, B, \dots, A_n)$

Теорема. Пусть $AX = B$ - квадратная СЛУ с невырожденной A

Тогда СЛУ имеет единственное решение и это решение можно найти по формуле:

$$x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \dots, x_n = \frac{\Delta_n}{\Delta}$$

Доказательство. Т.к. A - невырожденная, то $\det A \neq 0 \implies A \rightsquigarrow E$

Будем решать СЛУ методом Гаусса:

$$(A|B) = (E|\tilde{B}) \implies \begin{cases} x_1 = \tilde{b}_1 \\ \vdots \\ x_n = \tilde{b}_n \end{cases}$$

$$\frac{\Delta_i}{\Delta} = \frac{\det(A_1, \dots, B, \dots, A_n)}{\det(A_1, \dots, A_k, \dots, A_n)} = \frac{\det(E_1, \dots, \tilde{B}, \dots, E_n)}{\det(E_1, \dots, E_k, \dots, E_n)} = \frac{\tilde{b}_i}{1} = \tilde{b}_i$$

\square

8.7 Обратная матрица

Пусть A - квадратная матрица порядка n

Определение. Матрица B - называется обратной матрицей к A , если:

$$\begin{cases} A * B = E \\ B * A = E \end{cases}$$

Обозначается A^{-1}

Утверждение. Если квадратная матрица A , имеет обратную матрицу, то она одна.

Доказательство. Пусть \exists две обратной матрицы B_1, B_2 , тогда:

$$B_1(AB_2) = (B_1A)B_2$$

$$B_1E = EB_2$$

$$B_1 = B_2$$

□

Свойства.

1. Если матрица A имеет обратную, то A^{-1} тоже имеет обратную, причем $(A^{-1})^{-1} = A$
2. Если матрица A имеет обратную, $\lambda \neq 0$, то λA , тоже имеет обратную, причем $(\lambda A)^{-1} = \lambda^{-1}A^{-1}$
3. Если матрица A имеет обратную, то A^T тоже имеет обратную, причем $(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$
4. Если матрицы A, B квадратные порядка n и каждая имеет обратную, то AB тоже имеет обратную, причем $(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$

Доказательство. Докажем, что $B^{-1}A^{-1}$ удовлетворяет определению отбратной матрицы для AB

$$(A|B)(B^{-1}|A^{-1}) = A(BB^{-1})A^{-1} = AEA^{-1} = AA^{-1} = E$$

$$(B^{-1}|A^{-1})(A|B) = B^{-1}(A^{-1}A)B = B^{-1}EB = B^{-1}B = E$$

$$\implies (A|B)(B^{-1}|A^{-1}) = (B^{-1}|A^{-1})(A|B)$$

□

Замечание. A, B , имеют обратные $\nRightarrow A + B$, имеют обратную.

Пример. A и $-A$

Утверждение. Любая элементарная матрица T имеет обратную, причем она соответствует обратному преобразованию.

Доказательство. Непосредственная проверка □

Теорема. (Критерий существования обратной матрицы)

Квадратная матрица A имеет обратную \iff она невырожденная.

Доказательство. Пусть A - квадратная, порядка n

Надо доказать, что $EA^{-1} \iff rkA = n \iff detA \neq 0$

\implies Пусть $\exists A^{-1}$. По определению $\exists B : AB = E$

Вычислим определитель из обеих частей равенства:

$$detA \cdot detB = det(AB) = detE = 1 \implies detA \neq 0$$

\Leftarrow Пусть A - невырожденная, $detA \neq 0 \implies A \rightsquigarrow E \implies \exists$ элементарная матрица

$$T_1, \dots, T_k : (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A = E(*)$$

По утверждению $\forall i = \overline{1, k}$ T_i имеет обратную.

По свойству (4) : $T_1 \cdot \dots \cdot T_k$ имеет обратную.

$$\text{Умножим } (*) \text{ на обратную к } T_1 \cdot \dots \cdot T_k : (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)^{-1} \cdot (T_1 \cdot \dots \cdot T_k) \cdot A = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)^{-1}E \implies A = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)^{-1}E$$

$$\text{По свойству (1) : } A, \text{ как обратная к } (T_1 \cdot \dots \cdot T_k), \text{ имеет обратную и } A^{-1} = ((T_1 \cdot \dots \cdot T_k)^{-1})^{-1} = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)$$

□

Из доказательства имеем:

$$1. A^{-1} = T_1 \cdot \dots \cdot T_k = (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)E$$

$$2. (T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A = E$$

Т.е. A^{-1} получена из E с помощью ЭП над строками, которые приводят A к E .
Что бы производить ЭП над строками матрицы E такие как над строками A , преобразования делают над расширенной матрицей:

$$(A|E) \rightsquigarrow ((T_1 \cdot \dots \cdot T_k)A(T_1 \cdot \dots \cdot T_k)E) = (E|A^{-1})$$

Это метод нахождения обратной матрицы

Теорема. (о явном выражении элементов обратной матрицы)

Пусть $A = (a_{ij})$ - квадратная матрица порядка n , тогда обратная матрица к A A^{-1} и её элементы могут найдены по формуле:

$$b_{ij} = \frac{1}{\det A} \cdot A_{ji}$$

где $A^{-1} = (b_{ij})$, A_{ji} - алгебраическое дополнение.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}$$

Доказательство. Т.к. A - невырожденная, то $\exists A^{-1}$ по предыдущей теореме Обратная матрица к A удовлетворяет уравнению: $AX = B$

Пусть $X = (X_1, \dots, X_n)$, $E = (E_1, \dots, E_n)$

Тогда $AX = B$ эквивалентно системе:

$$\begin{cases} AX_1 = E_1 \\ AX_2 = E_2 \\ \vdots \\ AX_n = E_n \end{cases}$$

Для любого $k = \overline{1, n}$ $AX_k = E_k$ - квадратная СЛУ с невырожденной матрицей коэффициентов \implies Решение единственное и может быть найдено по формулам Крамера:

$$X_k = \begin{pmatrix} X_{1,k} \\ \vdots \\ X_{n,k} \end{pmatrix}, \quad \text{где } \forall i = \overline{1, n}, \quad X_{i,k} = \frac{\Delta_i}{\Delta} = \frac{\Delta_i}{\det A}$$

$$\Delta_i = \det(A_1, \dots, E_k, \dots, A_n) = \dots = A_{ki} \implies X_{i,k} = \frac{A_{ki}}{\det A}$$

□

9 Алгебраические структуры

A, B - множества.

Декартово произведение: $A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$

Определение. Бинарное отношение на множестве A называется отображением

$$\rho : A \times A \rightarrow A$$

Обозначается:

$$1. \rho(a_1, a_2) = a_3$$

$$2. a_1 \rho a_2 = a_3$$

$$3. a_1 * a_2 = a_3$$

4. $(A, *)$ — на A задана бинарная операция $*$

Определение. $(A, *)$. Говорят, что на A определена алгебраическая структура. $(A, *)$ называется алгебраической системой.

Определение. Бинарная операция $(*)$ на A называется коммутативностью, если $\forall a, b \in A : a * b = b * a$

Определение. Бинарная операция $(*)$ на A называется ассоциативной, если $\forall a, b, c \in A : a * (b * c) = (a * b) * c$

Примеры.

1. $(\mathbb{Z}, +)$ ассоциативна и коммутативна.
2. $(\mathbb{Z}, -)$ НЕ ассоциативна и НЕ коммутативна
3. $(M_{m \times n}, +)$ ассоциативна и коммутативна.
4. $(M_{m \times n}, \cdot)$ ассоциативна и НЕ коммутативна.

Определение. Элемент $e \in A$ называется нейтральным элементом относительно бинарной операции $(*)$, если $\forall a \in A : a * e = e * a = a$

Примеры.

1. $(\mathbb{Z}, +) e = 0$
2. $(\mathbb{Z}, \cdot) e = 1$
3. $(\mathbb{Z}, -) \nexists e$
4. $(\mathbb{N}, +) \nexists e$

Утверждение. Если нейтральный элемент существует, то он единственный.

Доказательство. (От противного) Допустим, что $\exists e_1, e_2 \in A$ — нейтральные

$$e_1 \neq e_2 \implies \underbrace{e_1}_{\text{нейтральный}} * e_2 = e_1; \quad e_1 * \underbrace{e_2}_{\text{нейтральный}} = e_2 \implies e_1 = e_2$$

□

Определение. Группоид - это множество A , на котором введена бинарная операция $(*)$. $(A, *)$

Определение. Полугруппа - группоид с ассоциативной бинарной операцией.

Определение. Моноид - полугруппа, в которой \exists нейтральный элемент.

Обозначение: $(A, *, e)$

Утверждение. Если элемент a моноида A имеет обратный, то этот обратный единственный.

Доказательство. Допустим $\exists b_1, b_2$ - обратные к a элементы: $b_1 \neq b_2$

В силу ассоциативности:

$$b_1 * (a * b_2) = (b_1 * a) * b_2$$

$$b_1 * e = e * b_2$$

$$b_1 = b_2$$

□

Примеры.

1. $(M_{n \times m}(\mathbb{R}), \cdot, E)$ моноид, $\exists A^{-1} \iff \det \neq 0$
2. $(\mathbb{Z}, \cdot, 1)$ моноид, $1, -1$ обратимы
3. $(\mathbb{R}, \cdot, 1)$ моноид, $\forall a \neq 0 : \exists a^{-1}$

Свойства.

- 1) Если элемент a имеет обратный b , то элемент b имеет обратный и этот обратный равен a
- 2) Если a_1 имеет обратный b_1 , a_2 имеет обратный b_2 , то: $a_1 * a_2 = b_2 * b_1$

Доказательство. Группа - моноид, в котором каждый элемент имеет обратный. □

Примеры.

1. $(\mathbb{Z}, +, 0)$ - группа (абелева)
2. $(\mathbb{Z}, \cdot, 1)$ - НЕ группа (коммутативный моноид)
3. $(\mathbb{R}, \cdot, 1)$ - НЕ группа

4. $(\mathbb{R}/\{0\}, \cdot, 1)$ - группа (абелева)
5. $(M_{m \times n}(\mathbb{R}), \cdot, E)$ - НЕ группа
6. (GL_n, \cdot, E) - группа
 $(GL_n$ - множество невырожденных матриц порядка n с коэф. из \mathbb{R})

Определение. Группоид (полугруппа, моноид, группа) называется коммутативной, если бинарная операция коммутативна.

Определение. Абелева группа - коммутативная группа.

Определение. Множество A , на котором задана бинарная операция $(*)$ называется группой, если:

1. $\forall a, b, c \in A : a * (b * c) = (a * b) * c$ (ассоциативность)
2. $\exists e \in A : \forall a \in A a * e = e * a = a$ (нейтральный элемент)
3. $\forall a \in A \exists b \in A : a * b = b * a = e$ (обратный элемент)

Терминология		
	Аддитивность	Мультипликативность
$*$	$+$, сложение	\cdot , умножение
e	0 , нулевой элемент	1 , единичный элемент
обратный к a	$-a$, противоположный	a^{-1} , обратный

9.1 Изоморфизм группы

Пусть $(G_1, *, e_1)$, (G_2, \circ, e_2) - группы

Определение. Группы G_1, G_2 называются изоморфными, если \exists отображение $\varphi : G_1 \rightarrow G_2$:

1. φ - биекция.
2. $\forall a, b \in G_1 : \varphi(a * b) = \varphi(a) \circ \varphi(b)$

Обозначение: $G_1 \cong G_2$

При этом отображение называется изоморфизмом групп.

Пример. $(\mathbb{R}, +, 0), (\mathbb{R}^+, \cdot, 1)$

$\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$

$$\begin{cases} \varphi(x) = e^x - \text{биекция} \\ \varphi(a+b) = e^{a+b} = e^a \cdot e^b = \varphi(a) \cdot \varphi(b) \end{cases} \implies \mathbb{R} \cong \mathbb{R}^+$$

Свойства.

$$1. \varphi(e_1) = e_2$$

$$2. \varphi(a^{-1}) = \varphi(a)^{-1}$$

Доказательство.

$$1) \forall a \in G_1 :$$

$$a * e_1 = a$$

$$\varphi(a * e_1) = \varphi(a)$$

$$\varphi(a) \circ \varphi(e_1) = \varphi(a)$$

Т.к. G_2 - группа, то $\exists \varphi(a)^{-1}$. Умножение на $\varphi(a)^{-1}$ слева:

$$\varphi(a)^{-1} \circ (\varphi(a) \circ \varphi(e_1)) = \varphi(a)^{-1} \circ \varphi(a) = e_2$$

2)

$$a^{-1} * a = e_1$$

$$\varphi(a^{-1} * a) = \varphi(e_1) = e_2$$

$$\varphi(a^{-1}) \circ \varphi(a) = e_2$$

\implies обратный к $\varphi(a)$ является $\varphi(a)^{-1}$

Аналогично $\varphi(a) \circ \varphi(a^{-1}) = e_2$

□

9.2 Группа подстановок

Определение. Подстановкой степени n называется биективное отображение σ множества $\{1, \dots, n\}$ в себя.

$$\{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\} - \text{биективная}$$

Подстановку можно написать в виде таблицы:

$$\sigma = \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_n \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_n \end{pmatrix}$$

В верхней строке расположены числа от 1 до n в некотором порядке. В нижней строке расположены их образы, т.е. $j_k = \sigma(i_k)$

Пример. $n = 3$:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}$$

Если поменять столбцы местами, отображение не изменится.

Если в верхней строке числа упорядочить по возрастанию, то такая запись называется стандартной.

Определение. Подстановка id степени n называется тождественной, если:

$$\forall k \in \{1, \dots, n\} : id(k) = k$$

т.е.

$$id = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ 1 & 2 & \dots & n \end{pmatrix}$$

Обозначение: $\Omega = \{1, \dots, n\}$

Определение. Произведение подстановок π и τ степени n - это их композиция $\pi \circ \tau$, т.е.

$$(\pi \circ \tau)(k) = \pi(\tau(k))$$

Утверждение. (1) Произведение подстановок степени n - снова подстановка длины n

Утверждение. (2) Множество S_n всех подстановок степени n относительно этого произведения (композиции) является группой.

Доказательство. По утверждению (1) произведение - это бинарное отношение:

- 1) ассоциативность верна
- 2) id - нейтральный элемент
- 3) $\forall \sigma \in S_n \exists \sigma^{-1} \in S_n$, т.к. $\sigma : \Omega \xrightarrow{\text{биекция}} \Omega$

□

Определение. Эта группа называется симметрической группой степени n (группой подстановок степени n)

Обозначение: S_n

Утверждение. $|S_n| = n!$

Утверждение. Группа S_n НЕ коммутативная.

Пример.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Определение. Циклом длины k называется подстановка (обозначение: (i_1, \dots, i_k)), которая $\forall i \in \{1, \dots, n\} \setminus \{i_1, \dots, i_k\}$, где $\sigma(i) = i$, при этом:

$$\sigma(i_1) = i_2, \sigma(i_2) = i_3, \dots, \sigma(i_k) = i_1$$

Представление в виде графа: РИСУНОК

Пример. $n = 6, \sigma = (1, 3, 2)$ РИСУНОК

Замечание. Заметим, что $(i_1, i_2, \dots, i_k) = (i_k, i_1, \dots, i_{k-1}) = (i_2, i_3, \dots, i_1) = \dots$

Определение. Циклы (i_1, \dots, i_k) и j_1, \dots, j_k называется независимыми, если:

$$\{i_1, \dots, i_k\} \cap \{j_1, \dots, j_k\} = \emptyset$$

Пример. $(1, 2, 3), (4, 5)$

Утверждение. Независимые циклы коммутируют.

Пример. $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 2 & 3 & 1 & 5 & 4 & 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 5 \\ 5 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix}$ РИСУНОК

Теорема 1. Любая подстановка $\sigma \in S_n$, $\sigma \neq id$ раскладывается в произведение независимых циклов длины ≥ 2 , причем это разложение единственно с точностью до перестановки множителей.

Доказательство.

\exists : Рассмотрим степени подстановки σ .

По определению $\sigma^0 := id$; $\sigma^m := \sigma \cdot \dots \cdot \sigma$, при $m > 0$;

$$\sigma^m := \sigma^{-1} \cdot \dots \cdot \sigma^{-1}, \text{ при } m < 0$$

Отметим, что:

1. Степень подстановки σ^m - это подстановка $\forall m \in \mathbb{Z}$
2. $\sigma^{m_1} \cdot \sigma^{m_2} = \sigma^{m_1+m_2}$
3. $(\sigma^{m_1})^{m_2} = \sigma^{m_1 \cdot m_2}$

Рассмотрим произвольный $i \in \{1, \dots, n\}$

РИСУНОК

Множество $Orb(i) = \{\sigma^m(i) \mid m \in \mathbb{Z}\}$ называется орбитой числа i . $Orb(i) \subseteq \{1, \dots, n\} \implies \exists m_1, m_2 \in \mathbb{Z} : \sigma^{m_1}(i) = \sigma^{m_2}(i) \implies$ допустим $m_1 > m_2$. $\sigma^{m_1-m_2}(i) = j \implies$ (т.к. $m_1 - m_2 \in \mathbb{N}$) наименьшее натуральное $k \in \mathbb{N}^0 : \sigma^k(i) = j$ ($Orb(i) = \{i, \sigma(i), \dots, \sigma^{k-1}(i)\}$).

Свойства.

1. Различные орбиты не пересекаются.

Доказательство. $Orb(i) \cap Orb(j) \ni l \implies \exists m_1, m_2 \in \mathbb{N}^0 :$

$$\sigma^{m_1}(i) = l = \sigma^{m_2}(j) \implies \sigma^{m_1-m_2}(i) = j \implies \forall m \in \mathbb{Z}$$

$$\sigma^m(j) = \sigma^{m_1-m_2}(i) \implies Orb(j) \subseteq Orb(i)$$

$$\text{Аналогично } Orb(i) \subseteq Orb(j) \implies Orb(i) = Orb(j) \quad \square$$

2. $\{1, \dots, n\} = Orb(i_1) \cup \dots \cup Orb(i_s)$

Доказательство. Т.к. $\forall i \in \{1, \dots, n\} i \in Orb(i)$ \square

$$\{1, \dots, n\} = \underbrace{Orb(i_1)}_{k_1} \sqcup \dots \sqcup \underbrace{Orb(i_t)}_{k_t} \sqcup \underbrace{Orb(i_{t+1})}_{k_{t+1}} \sqcup \dots \sqcup \underbrace{Orb(i_s)}_{k_s}$$

Если $\sigma \neq id$, то $k_1 > 1, \dots, k_t > 1, k_{t+1} = 1, \dots, k_s = 1 \implies$

$$\sigma = (i_1 \sigma(i_1) \dots \sigma^{k_1-1}(i_1)) \dots (i_t \sigma(i_t) \dots \sigma^{k_t-1}(i_t)). \exists \text{ доказано.}$$

! : (От противного)

Допустим,

$$\sigma = \pi_1, \dots, \pi_\nu$$

$$\sigma = \tau_1, \dots, \tau_\mu$$

Различные разложения на независимые циклы длины ≥ 2

Т.к. $\sigma \neq id$, то $\exists j : \sigma(j) \neq j \implies$ с точностью до нумерации $\pi_1(j) \neq j, \tau_1(j) \neq j$

$$\begin{aligned} \sigma(j) = \pi_1(j) & \implies \forall m \in \mathbb{Z} & \sigma^m(j) = \pi_1^m(j) \\ \sigma(j) = \tau_1(j) & \implies \forall m \in \mathbb{Z} & \sigma^m(j) = \tau_1^m(j) \end{aligned}$$

Т.к. ... полностью определяется степенями σ , то $\pi_1 = \tau_1 \implies \pi_2 \dots \pi_\nu = \tau_2 \dots \tau_\mu$

Далее индукция по ν и $\mu \implies$ Противоречие \implies Разложение единственно. \square

Определение. Цикл длины 2 называется транспозицией.

Теорема. Любая подстановка $\sigma \in S_n$ раскладывается в произведение транспозиций.

Доказательство. Если $\sigma = id$, то $\sigma = (12)(12)$

Если $\sigma \neq id$, то по Теореме (1) σ раскладывается в произведение независимых циклов длины ≥ 2

Поэтому достаточно разложить на транспозиции каждый такой цикл.

$$k > 1 \quad (1, 2, \dots, k) = (1, k)(1, k-1)\dots(1, 3)(1, 2)$$

□

9.3 Четность подстановки

$$\sigma \in S_n \quad \sigma = \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix}$$

Определение. Знаком подстановки σ называется функция:

$$sgn\sigma := sgn(i_1, \dots, i_n) \cdot sgn(j_1, \dots, j_n)$$

Утверждение. Знак подстановки не зависит от способа записи подстановки в виде таблицы.

Доказательство. Если $\begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} m_1 & \cdots & m_n \\ k_1 & \cdots & k_n \end{pmatrix}$ - две записи одной и той же подстановки σ , то от $\begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix}$ к $\begin{pmatrix} m_1 & \cdots & m_n \\ k_1 & \cdots & k_n \end{pmatrix}$ можно перейти за конечное число перемен столбцов местами. Каждая перемена столбцов местами производят транспозицию в верхней и в нижней строке \implies знак меняется и там, и там \implies знак произведения не изменяется. □

$$\text{В стандартной записи } \sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ i_1 & i_2 & \cdots & i_n \end{pmatrix} \implies sgn\sigma = sgn(i_1, i_2, \dots, i_n)$$

Определение. Подстановка σ называется четной (нечетной), если:

$$sgn\sigma = +1 (sgn\sigma = -1)$$

Свойства.

$$1. \quad sgn\sigma^{-1} = sgn\sigma$$

$$\text{Доказательство. } \sigma = \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix} \implies \sigma^{-1} = \begin{pmatrix} j_1 & \cdots & j_n \\ i_1 & \cdots & i_n \end{pmatrix}$$

□

$$2. \operatorname{sgn}(\sigma \cdot \tau) = \operatorname{sgn}(\sigma) \cdot \operatorname{sgn}(\tau) \quad (\sigma, \tau \in S_n)$$

Доказательство.

$$\sigma = \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix}, \tau = \begin{pmatrix} k_1 & \cdots & k_n \\ i_1 & \cdots & i_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \sigma \cdot \tau &= \begin{pmatrix} k_1 & \cdots & k_n \\ j_1 & \cdots & j_n \end{pmatrix} \Rightarrow \operatorname{sgn}(\sigma \cdot \tau) = \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) \cdot \operatorname{sgn}(j_1, \dots, j_n) = \\ &= \operatorname{sgn}(k_1, \dots, k_n) \cdot \underbrace{\operatorname{sgn}(i_1, \dots, i_n) \cdot \operatorname{sgn}(i_1, \dots, i_n)}_1 \cdot \operatorname{sgn}(j_1, \dots, j_n) = \operatorname{sgn}(\sigma) \cdot \operatorname{sgn}(\tau) \end{aligned}$$

□

Утверждение.

1. если τ - транспозиция, то $\operatorname{sgn}(\tau) = -1$
2. если σ - цикл длины k , то $\operatorname{sgn}(\sigma) = (-1)^{k-1}$
3. если $\sigma = \tau_1 \cdot \dots \cdot \tau_l$, где τ_i - транспозиции, то $\operatorname{sgn}(\sigma) = -1^l$

Доказательство.

1)

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & i & \cdots & j & \cdots & n \\ 1 & \cdots & j & \cdots & i & \cdots & n \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \operatorname{sgn}(\tau) = \operatorname{sgn}(1, \dots, j, \dots, i, \dots, n) = \operatorname{sgn}(1, \dots, i, \dots, j, \dots, n) = -1$$

3) следует из Свойства (2) и Утверждения (1):

$$\operatorname{sgn}(\sigma) = \operatorname{sgn}(\tau_1) \cdot \operatorname{sgn}(\tau_2) \cdot \dots \cdot \operatorname{sgn}(\tau_l) = \underbrace{(-1) \cdot (-1) \cdot \dots \cdot (-1)}_l = (-1)^l$$

$$2) \sigma = (i_1, \dots, i_k) = (i_1, i_k)(i_1, i_{k-1}) \dots (i_1, i_2) = (\text{по Утверждения (3)}) = (-1)^{k-1}$$

□

Пример.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 1 & 2 & 5 & 4 & 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 & 5 \end{pmatrix} = (-1)^{2 \cdot ???}$$

9.4 Подгруппа

$(A, *)$ - множество с бинарной операцией $B \subseteq A$

Определение. Говорят, что B замкнуто относительно бинарной операции $*$, если:

$$\forall b_1, b_2 \in B \quad b_1 * b_2 \in B$$

В этом случае B превращается в алгебраическую структуру.

Пример. \mathbb{N} (коммутативная полугруппа) $\subset \mathbb{Z}$ ($+$ абелева группа)

Определение. Множество H называется подгруппой группы G , если:

1. $\forall h_1, h_2 \in H \implies h_1 \cdot h_2 \in H$
2. $1 \in H$
3. $\forall h \in H \implies h^{-1} \in H$

Обозначается: $H \leq G$

Утверждение. Любая подгруппа группы G сама является группой, относительно той же операции.

Замечание. В определении подгруппы (2.) \longleftrightarrow " $H \neq \emptyset$ "

Примеры.

- 1) $\mathbb{N} \leq \mathbb{Z}$
- 2) $\mathbb{Z} \leq \mathbb{Q} \leq \mathbb{R}$
- 3) $m\mathbb{Z} \leq \mathbb{Z}, m \in \mathbb{N}$
- 4) A_n - все четные подстановки
 $A_n \leq S_n$. (для нечетных неверно)