

Part I

Алгебра

# Chapter 1

## Линейная алгебра. Векторные пространства

### 1.1 Лекция 1

$X$  - множество

$*$  :  $X \times X \rightarrow X$

$(x, y) \mapsto x * y$

**Аксиомы:**

1.  $\forall x, y, z \in X : x * (y * z) = (x * y) * z$  (ассоциативность)
2.  $\exists e \in X \forall a \in X : e * a = a * e = a$  (нейтральный элемент)
3.  $\forall a \in X \exists a' \in X : a * a' = a' * a = e$  (обратный элемент)
4.  $\forall a, b \in X : a * b = b * a$  (коммутативность)

**Определение 1.** Множество  $X$  с операцией  $*$ , удовлетворяющее аксиоме 1, называется **полугруппой**

**Определение 2.** Множество  $X$  с операцией  $*$ , удовлетворяющее аксиомам 1-2, называется **моноидом**

**Определение 3.** Множество  $X$  с операцией  $*$ , удовлетворяющее аксиомам 1-3, называется **группой**

**Определение 4.** Множество  $X$  с операцией  $*$ , удовлетворяющее аксиомам 1-4, называется **коммутативной** или **абелевой группой**

**Примеры.**

1.  $(\mathbb{Z}, +)$  – группа
2.  $(\mathbb{N}, +)$  – полугруппа

3.  $(\mathbb{N}_0, +)$  – моноид

4.  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$  – группа

5. Пусть  $A$  – множество

$X :=$  множество биективных отображений  $A \rightarrow A$

$id_A$  – нейтральный элемент

Если  $f(x) = y$ , то  $\tilde{f}(y) = x$  – обратная функция ( $f \circ \tilde{f} = \tilde{f} \circ f = id_A$ ).

$f(x) = x + 1$ ,  $g(x) = 2x$ ,  $id_A(x) = x$

$f \circ g(x) = f(g(x)) = f(2x) = 2x + 1$

$g \circ f(x) = g(f(x)) = g(x + 1) = 2x + 2 \neq 2x + 1$

Следовательно,  $(X, \circ)$  – не коммутативная группа

### Обозначение.

- $\cdot$  – мультипликативность,  $1$ ,  $x^{-1}$
- $+$  – аддитивность,  $0$ ,  $-x$
- $\circ$  – относительно композиции,  $id$ ,  $x^{-1}$
- $*$  – абстрактная операция,  $e$ ,  $x^{-1}$

Пусть  $(R, +)$  – абелева группа

Определим отображение

$$\cdot : R \times R \rightarrow R$$

$$(a, b) \mapsto a \cdot b$$

Для  $(R, +, \cdot)$  могут быть верны следующие аксиомы:

5.  $a(b + c) = ab + ac$   
 $(b + c)a = ba + ca$  (дистрибутивность)
6.  $a(bc) = (ab)c$  (ассоциативность)
7.  $\exists 1_R \forall a \in R : 1_R \cdot a = a \cdot 1_R = a$  (нейтральный элемент)
8.  $ab = ba$  (коммутативность)
9.  $0_R \neq 1_R$
10.  $\forall a \neq 0_R \exists a^{-1} : a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = 1_R$  (обратный элемент)

**Определение 5.**  $(R, +, \cdot)$ , удовлетворяющее аксиоме 5, называется **не ассоциативным кольцом без единицы**.

**Определение 6.**  $(R, +, \cdot)$ , удовлетворяющее аксиомам 5-6, называется **ассоциативным кольцом без единицы**.

**Определение 7.**  $(R, +, \cdot)$ , удовлетворяющее аксиоме 5-7, называется **ассоциативным кольцом с единицей**.

**Определение 8.**  $(R, +, \cdot)$ , удовлетворяющее аксиомам 5-8, называется **коммутативным кольцом**.

**Примеры.**

1.  $\mathbb{Z}$  – коммутативное кольцо

2.  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$  – поля

3. Рассмотрим  $\mathbb{Z}_n = 0, \dots, n-1$  с операциями  $+_n, \cdot_n$  :

$$a +_n b = (a + b) \% n$$

$$a \cdot_n b = (a \cdot b) \% n$$

Обратимые элементы:

$$ax = 1 + ny$$

$$ax - ny = 1$$

Если  $(a, n) = 1$ , есть решение, иначе – нет.  $\mathbb{Z}_p$  – поле  $\Leftrightarrow p \in \mathbb{P}$

## 1.2 Лекция 2

**Определение 9.**  $V$  – векторное пространство над полем  $F$ , если  $(V, +)$  – абелева группа, задано отображение  $V \times F \rightarrow V$

$(x, \alpha) \mapsto x \cdot \alpha$ , удовлетворяющее аксиомам  $\forall x, y \in V, \forall a, b \in F$ :

$$5. x \cdot (\alpha \cdot \beta) = (x \cdot \alpha) \cdot \beta$$

$$6. (x + y) \cdot \alpha = x \cdot \alpha + y \cdot \alpha$$

$$x \cdot (\alpha + \beta) = x \cdot \alpha + x \cdot \beta$$

$$7. x \cdot 1_F = x$$

$$A \in M_n(F), \alpha \in F$$

$$(A, \alpha)_{ij} = a_{ij} \cdot \alpha$$

$$(AB)\alpha = A(B\alpha)$$

**Примеры.**

1. Множество векторов в  $\mathbb{R}^3$

$$2. F^n = \left\{ \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \mid a_i \in F \right\}$$

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}$$

3.  $X$  - множество,  $F^X = \{f \mid f : X \rightarrow F\}$   
 $f, g : X \rightarrow F$   
 $(f + g)(x) = f(x) + g(x)$   
 $(f\alpha)(x) = f(x)\alpha$
4.  $F[t]$  - многочлены от одной переменной  $t$
5.  $V$  - абелева группа, в которой  $\forall a \in V : \underbrace{a + a + \dots + a}_{p \in \mathbb{P}} = 0$  Тогда  $V$  - векторное пространство над  $\mathbb{Z}_p$   $k \cdot a = \underbrace{a + \dots + a}_k$

### 1.3 Лекция 3

**Определение 10.** Алгебра  $A$  над полем  $F$  – кольцо, являющееся векторным пространством над  $F$  ("+" - операция в кольце и в векторном пространстве), такое что  $(ab)\alpha = a(b\alpha)$   $a, b \in A, \alpha \in F$

**Пример.**  $(\mathbb{R}^3, +, \times)$  - не ассоциативная алгебра на  $\mathbb{R}$

**Определение 11.** Матрица размера  $I \times J$  ( $I, J$  - множества индексов) над множеством  $X$  - это функция

$$A : I \times J \rightarrow X, \quad (i, j) \rightarrow a_{ij}.$$

Пусть определено умножение  $X \times Y \rightarrow Z, \quad (x, y) \rightarrow xy$   
 $(Z$  - коммутативный моноид относительно "+")

**Определение 12.** Строка - матрица размера  $\{1\} \times J$   
 Столбец - матрица размера  $J \times \{1\}$

$A$  - строка длины  $J$  над  $X$

$B$  - строка длины  $J$  над  $Y$

Тогда произведение  $AB = \sum_{j \in J} a_{1j} b_{j1} \in Z$

$x \rightarrow x_e$  - координаты вектора  $x$

$$\underbrace{x \cdot y}_{\text{скалярное произведение}} = x_e^T \cdot y_e$$

**Определение 13.** Транспонирование матрицы.

$D$  - матрица  $I \times J$  над  $X$

$D^T$  - матрица  $J \times I$  над  $X : (D^T)_{ij} = (D)_{ji}$

*Замечание.* Пусть в  $X$  есть элемент  $0 : 0 \cdot y = 0 \quad \forall y \in Y$ . Все кроме конечного числа  $a_j = 0$ . Тогда  $AB$  имеет смысл, даже когда  $|J| = \infty$ .

"почти все" = кроме конечного количества

**Обозначение.**

$a_{i*}$  -  $i$ -я строка матрицы  $A$

$a_{*j}$  -  $j$ -й столбец матрицы  $A$

### 1.3.1 Произведение матриц

$A$  - матрица  $I \times J$  над  $X$ .

$B$  - матрица  $J \times K$  над  $Y$ .

$AB$  - матрица  $I \times K$  над  $Z = X \cdot Y$ ,  $(AB)_{ik} = a_{i*} \cdot b_{*k} = \sum_{j \in J} a_{ij} \cdot b_{jk}$ .

$$(x_1, \dots, x_n) \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = va, \quad v \in V, a \in F.$$

## 1.4 Лекция 4

**Определение 14.**  $(G, *)$ ,  $(H, \#)$ - группа

$\varphi : G \rightarrow H$ - гомоморфизм, если:

$$\varphi(g_1 * g_2) = \varphi(g_1) \# \varphi(g_2)$$

**Определение 15.**  $R, S$  -кольца

$\varphi : R \rightarrow S$  - гомоморфизм, если:

$$\varphi(r_1 + r_2) = \varphi(r_1) + \varphi(r_2)$$

$$\varphi(r_1 \cdot r_2) = \varphi(r_1) \cdot \varphi(r_2)$$

Для колец с 1:  $\varphi(1) = 1$

**Определение 16.**  $U, V$  - векторные пространства над  $F$

$\varphi : U \rightarrow V$  - линейное отображение, если:

$$\varphi(u_1 + u_2) = \varphi(u_1) + \varphi(u_2)$$

$$\varphi(u\alpha) = \varphi(u)\alpha$$

*Замечание.* Изоморфизм – биективный гомоморфизм.

**Определение 17.**  $V$  - векторное пространство над полем  $F$

$v$  - строка элементов "длины"  $I$  над  $V$

$a$  - столбец "высоты"  $I$ , почти все элементы которого равны 0.

Тогда  $va$  - линейная комбинация набора  $v$  с коэффициентами .

*Замечание.*  $U \subset V$

$U$  является векторным пространством относительно тех же операций, которые заданы в  $V$ . Тогда  $U$  - подпространство  $V$

**Лемма.**  $U \subseteq V$

$\forall u_1, u_2 \in U, \alpha \in F :$

$u_1 + u_2 \in U, u_1 \alpha \in U$  Тогда  $U$  - подпространство. Если  $U$  - подпространство в  $V$ , то пишут  $U \subseteq V$ .

**Определение 18.**  $v = \{v_i | i \in I\}$ , где  $v_i \in V \forall i \in I$

$\langle v \rangle$  - наименьшее подпространство, содержащее все  $v_i$

**Лемма.**  $\langle v \rangle = \{va | a - \text{столбец высоты } I \text{ над } F, \text{ где почти всюду элементы равны нулю}\} = U$

*Доказательство.*  $v_i \in \langle v \rangle \Rightarrow v_i a_i \in \langle v \rangle$

$\Rightarrow v_{i_1} a_{i_1} + \dots + v_{i_k} a_{i_k} \in \langle v \rangle$

$\Rightarrow \langle v \rangle$  содержит все варианты комбинаций.  $va + vb = v(a + b) \in U$

$(va)\alpha = v(a\alpha) \in U$

$\Rightarrow$  множество линейных комбинаций – подпространство  $U$  - подпространство, содержащее  $v_i \forall i \in I$

$\langle v \rangle$  – наименьшее подпространство, содержащее  $v_i$

$\Rightarrow \langle v \rangle \subseteq U$  тогда  $\langle v \rangle = U$  □

**Определение 19.** Если  $\langle v \rangle = V$ , то  $v$  – система образующих пространство  $V$   
Базис – система образующих.

**Обозначение.**  $F^I$  – множество функций из  $I$  в  $F$  = множество столбцов высоты  $I$   
 ${}^I V$  – множество строк длины  $I$

Набор элементов из  $V$ , заиндексированных множеством  $I$  – это функция  $f : I \rightarrow V$   
 $i \mapsto f_c$

**Определение 20.**  $v \in {}^I V$

$v$  – линейно независим, если  $\forall a \in F^I, a \neq 0 \Rightarrow va \neq 0$

**Теорема 1.4.1.**  $v \subseteq V$  (можно считать, что  $v$  – строка длины  $v$ )  
Следующие утверждения эквивалентны:

1.  $v$  – линейно независимая система образующих
2.  $v$  – максимальная линейно-независимая система
3.  $v$  – минимальная система образующих
4.  $\forall x \in V \exists ! a \in F^v : x = va = \sum_{t \in v} t \cdot a_t$  (почти все элементы равны 0)

*Доказательство.* (1)  $\Rightarrow$  (4) – доказали ранее (1)  $\Rightarrow$  (2)

$$x \in V \setminus v$$

$$x = va(a \in F^v)$$

$$va = x \cdot 1 = 0 - \text{линейная зависимость набора } v \cup x$$

Т.о. любой набор, строго содержащий  $v$ , линейно зависим  $\Rightarrow v$  – максимальный.

$$(1) \Rightarrow (2)$$

$$x \in V \setminus$$

$$v \subseteq V \cup x - \text{линейно зависим}$$

$$va + xa_x = 0$$

$$a \neq 0$$

$$\text{Если } a_x = 0 \Rightarrow va = 0 \Rightarrow a = 0 \text{ ?!}$$

$$\text{Значит } a_x \neq 0$$

$$va = c \cdot (-a_x)$$

$$x = v \cdot \frac{a}{-a_x} \Rightarrow v - \text{система образующих.}$$

□

**Лемма.** (Цорн) Пусть  $\mathbb{A}$  – набор подмножеств (не всех) множества  $X$ .

Если объединение любой цепи из  $\mathbb{A}$ , принадлежащей  $\mathbb{A}$ , то в  $\mathbb{A}$  существует максимальный элемент.

$$M \in \mathbb{C} - \text{максимальная, если } M \subseteq M' \subseteq \mathbb{A} \Rightarrow M = M'$$

**Теорема 1.4.2.** (о существовании базиса)  $V$  – векторное пространства

$X$  – линейное независимое подмножество  $V$

$Y$  – система образующих  $V$

$$X \leq Y$$

Тогда существует базис  $Z$  пространства  $V : X \leq Z \leq Y$

*Доказательство.*  $\mathbb{A}$  – множество всех линейно независимых подмножеств, лежащих между  $X$  и  $Y$ .  $X \in \mathbb{A}$

$$\mathbb{C} \leq \mathbb{A}$$

$$X \leq \cup C \in \mathbb{C} \leq Y$$

Пусть  $\cup C \in \mathbb{C}$  – линейно зависимый. То есть  $\exists u_1, \dots, u_2 \in / \dots$

...

Пусть  $v$  – базис  $V$ .

$$\forall x \in V \exists! x_v \in F^v : x = v \cdot x_v$$

$$v = (v_1, \dots, v_n), x_v = \text{матрица столцов альфа;}$$

$$x = v_1 \alpha_1 + \dots = v \cdot x_v$$

□



## 1.5 Лекция 5

## 1.6 Лекция 6

## 1.7 Лекция 7

**Утверждение.**

$$U \leq W \iff \exists V \leq W : W = U \oplus V$$

*Доказательство.* Выберем базис  $u$  в  $U$ . Дополним до базиса  $u \cup v$  пространства  $W$  и положим  $V = \langle v \rangle$ .

$$\langle u \rangle = U \quad \langle v \rangle = V \quad \langle u \cup v \rangle = \langle u \rangle + \langle v \rangle = U \oplus V = W$$

$$x \in U \cap V \Rightarrow x = ua = vb \Leftrightarrow ua - vb = 0 \Rightarrow a = 0, b = 0 \quad (u \cup v - \text{линейно независимый})$$

□

**Следствие.**

$$u - \text{базис } U, v - \text{базис } V, U, V \leq W$$

$$u \cup v - \text{базис } W \Leftrightarrow U \oplus V$$

25.09.2019

## 1.8 Лекция 8

$$v = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in n^V$$

$$M_n(F) - \text{алгебра матриц размера } n \times n \text{ над } F$$

$$GL_n(F) = M_n(F)^* - \text{полная линейная группа степени } n \text{ над } F$$

**Лемма.**

$$v \in n^V, A \in GL_n(F)$$

$$v - \text{линейно независимый} \Leftrightarrow vA - \text{линейно независимый}$$

$$\langle v \rangle = \langle vA \rangle$$

*Доказательство.*  $(vA)A^{-1} = v(AA^{-1}) = vE = v$ , поэтому можно доказывать только в одну сторону.

$v$  - линейно независимый.

$$vAb = 0 \Rightarrow A^{-1}Ab = 0 \Rightarrow b = 0, \text{ т.е. } vA - \text{линейно независимый.}$$

$$(vA)b = v(Ab) \in \langle v \rangle, \langle vA \rangle \leq \langle v \rangle$$

□

**Утверждение.**  $u, v$  - два разных базиса пространства  $V$ .

Тогда  $\exists!$  матрица  $A \in GL_n(F) : u = vA$

При этом  $a_{*k} = (u_k)_v \quad \forall k = 1, \dots, n$ . Такая матрица обозначается  $C_{v \rightarrow u}$  и называется матрицей перехода от  $v$  к  $u$ .

$$C_{v \rightarrow u} C_{u \rightarrow v} = C_{v \rightarrow u} C_{u \rightarrow v} = E$$

*Доказательство.* Положим  $a_{*k} = (a_k)_v \Rightarrow u_k = va_{*k} \Rightarrow u = vA$ .

$vA = vB \Leftrightarrow A = B$  то есть  $A$  - единственно.

Далее:

$$\left. \begin{aligned} u &= vC_{v \rightarrow u} \\ v &= uC_{u \rightarrow v} \end{aligned} \right\}$$

$$uE - uC_{v \rightarrow u}C_{v \rightarrow u}$$

$$E = C_{u \rightarrow v}C_{v \rightarrow u}$$

□

**Следствие.**  $v$  - базис  $V$

$f : GL_n(F) \rightarrow$  множество базисов пространства  $V$

$f(A) = vA$  - биекция.

*Доказательство.*

$$|F| = q \quad \dim V = u$$

$$(q^n - 1)(q^n - q) \dots (q^n - q^{n-1}) - \text{количество базисов}$$

$\mathbb{F}$  - поле из  $q$  элементов.

□

**Утверждение.** Если матрица двусторонне обратима, то она квадратная.

**Следствие.**  $u, v$  - базисы  $V$

$$x = C_{u \rightarrow v} x_v$$

*Доказательство.*

$$x = ux_u = vx_v$$

$$v = uC_{u \rightarrow v}$$

$$ux_u = uC_{u \rightarrow v}x_v \Rightarrow x_u = C_{u \rightarrow v}x_v$$

□

**Следствие.** (Матричные линейные отображения)

$$L : U \rightarrow V, \quad u - \text{базис } U, v - \text{базис } V$$

Тогда  $\exists!$  матрица  $L_{v,u}(L_u^v : \forall x \in UL(x)_v = L_u^v x_u$

При этом  $(L_u^v)_{*k} = L(u_k)_v$

*Замечание.*

$$u = (u_1, \dots, u_n) \in n^U$$

$$L : U \rightarrow V$$

$$L(a) := (L(u_1), \dots, L(u_n))$$

$$L(ua) = L(u)a \quad a \in F^n$$

$$\varphi_v : V \rightarrow F^n$$

$$\varphi_v(g) = y_v \quad \forall g \in V$$

$$\varphi_v - \text{линейно} \Rightarrow (L(u)a)_v = L(u)_v a$$

$$L(u)_v := (L(u_1)_v, \dots, L(u_n)_v)$$

*Доказательство.*

$$x = ux_u$$

$$L(x) = L(u)x_u$$

$$L(x)_v = L(u)_v x_u$$

Положим  $L_u^v := L(u)_v$ .

$$\forall x \in U : L(x)_v = L_u^v x_u$$

$$\text{При } x = u_k : L(u_k)_v = L_u^v(u_k)_u = (L_u^v)_k$$

□

*Замечание.* Если  $Ax = Bx \quad \forall x \in F^n$ , то  $A = B$

26.09.2019

## 1.9 Лекция 9

**Примеры.**

1.  $V = \mathbb{R}[t]_3$  - многочлены степени не более 3

$$D(p) = p' \quad V \rightarrow V$$

$$v = (1, t, t^2, t^3).$$

$$D(1) = 0, D(t) = 1, D(t^2) = 2t.$$

$$D_v = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$v^{(1)} = (1, \frac{t}{1!}, \frac{t^2}{2!}, \frac{t^3}{3!}).$$

$$2. V = \mathbb{R}[t]$$

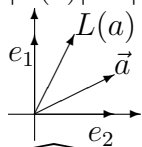
$$v = (1, t, \frac{t^2}{2}, \dots, \frac{t^n}{n!}, \dots).$$

$$D(v_0) = 0, D(v_k) = v_{k-1}.$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & \cdots \\ & 0 & 1 & \cdots \\ & & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & & \ddots \end{pmatrix}$$

$$3. V = \mathbb{R}^3$$

$$|L(a)| = |a|$$



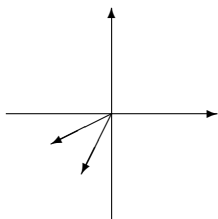
$$a, L(a) = \varphi$$

$$e = (e_1, e_2) \text{- базис}$$

$$L(e_1)_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$$

$$L(e_2)_e = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$L_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$



$$a_e = \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix}$$

$$L(a)_e = \begin{pmatrix} \cos(\psi + \varphi) \\ \sin(\psi + \varphi) \end{pmatrix}.$$

$$L(a)_e = L_e \cdot a_e = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \\ \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi \end{pmatrix}.$$

**Утверждение.**  $L : U \rightarrow V$

$u, u' - \text{базис } U$

$v, v' - \text{базис } V$

Тогда  $L_{u'}^{v'} = C_{v' \rightarrow v} L_u^v C_{u \rightarrow u'}$

*Доказательство.*

$$L(x)_v = L_u^v x_u.$$

$$C_{v' \rightarrow v} L(x)_v = L(x)_{v_1} = L_{u'}^{v'} x_{u'} = L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u} x_u.$$

$$\forall x_u \in F^{\dim U}$$

$$L(x)_v = C_{v \rightarrow v'} L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u} x_k.$$

$$L_u^v = C_{v \rightarrow v'} L_{u'}^{v'} C_{u' \rightarrow u}.$$

□

*Замечание.*

$$\text{Если } U = V \quad u = v, u' = v'.$$

$$L_{u'}^{v'} = C_{u' \rightarrow u} L_u^v C_{u \rightarrow u'}.$$

**Утверждение.** *Линейное отображение однозначно определяется образом базисных векторов.*

$u = (u_1, \dots, u_n) - \text{базис } U$

Для любого векторного пространства  $V$ :

$$\forall v_1, \dots, v_n \in V$$

$$\exists! \text{ линейное отображение } (*) L : U \rightarrow V : L(u_k) = v_k \quad \forall k$$

*Доказательство.*

$$L(ua) := va$$

$$\forall L^* : L(ua) = L(u)a = va$$

□

При этом  $L$  - инъективно тогда и только тогда, когда  $v$  - линейно независимый  
 $L$  - сюръективно тогда и только тогда, когда  $v$  - система образующих  
 $L$  - изоморфизм тогда и только тогда, когда  $v$  - базис.

**Утверждение.**  $V, \quad v, v' - \text{базис } V$

$L : V \rightarrow V - \text{линейно}$

$$L(v_k) = v'_k \quad \forall k$$

$$(L_v)_k = L(v_k)_v = (v'_k)_v$$

$$L_v = C_{v \rightarrow v'}.$$

по другому

$$(Id_{v'}^v)_k = Id(v'_k)_v = (v'_k)_v.$$

$$\text{Тогда } L_v = C_{v \rightarrow v'} = Id_{v'}^v.$$

**Определение 21.**  $f : X \rightarrow Y$

$$Imf = \{f(x) \mid x \in X\}$$

$L : U \rightarrow V$  - линейное отображение

$$ImL = \{L(x) \mid x \in U\}$$

$$KerL = L^{-1}(0) = \{x \in U \mid L(x) = 0\}$$

**Лемма.**

$$ImL \leq V$$

$$KerL \leq U$$

Пусть  $L(x) = y$

$$\begin{aligned}\forall y \in V : L^{-1} = x + KerL \\ L^{-1}(y) = \{z \in U \mid L(z) = y\} \\ x + KerL = \{x + z \mid z \in KerL\}\end{aligned}$$

## 1.10 Лекция 10

**Теорема 1.10.1.**  $L : U \rightarrow V$

$$\dim U = \dim KerL + \dim ImL.$$

*Доказательство.*  $u = (u_1, \dots, u_k)$  - базис  $KerL$

$v = (v_1, \dots, v_m)$  Дополним базис ядра до базиса  $U$ :  $u \cup v$  - базис  $U$

$L(v) = (L(v_1), L(v_2), \dots, L(v_m))$  - базис образа.  $\forall x \in ImL \exists y \in U : L(y) = x$ .

$$y = ua + vb, \quad a \in F^k, b \in F^m$$

$$x = L(y) = \underbrace{L(u)}_{(L(u_1), \dots, L(u_k)) = (0, \dots, 0)} + L(v).$$

Следовательно,  $L(v)$  - система образующих.

$$L(v)c = 0, \quad c \in F^m.$$

$$L(vc) = 0 \Rightarrow vc \in KerL \Rightarrow vc = ud \quad \text{для некоторого } d \in F^k.$$

Тогда  $vc - ud = 0$ , но  $v$  и  $u$  - два базисных вектора. Следовательно,  $c = d = 0$  и  $L(v)$  - линейно независимый.  $\square$

**Теорема 1.10.2.** (формула Грассмана о размерности суммы и пересечения)

$$U, V \leq W$$

$$\dim U \cap V + \dim U + V = \dim U + \dim V.$$

*Доказательство.*  $\triangleleft$  внешнюю сумму  $U \oplus V$ ,  $L(u, v) = u + v$

Тогда  $ImL = U + V$ .  $(u, v) \in KerL \Leftrightarrow u + v = 0 \Leftrightarrow u = -v \subset U \cap V$

$$KerL = (u, -u) \mid u \in U \cap V \cong U \cap V$$

$$\dim(U \oplus V) = \dim KerL + \dim ImL = \dim U \cap V + \dim U + V \quad \square$$

08.10.2019

## 1.11 Лекция 11

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \cdot x_1 + \dots + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \cdot x_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & & & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Простейший базис:

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, e_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

$$x = vx_v, \quad x = ex_e = Ex_e$$

$$eC_{e \rightarrow v} = v - \text{из столбцов } v.$$

$$C_{e \rightarrow v} = v - \text{матрица из столбцов } (v_1, \dots, v_n).$$

$$L : F^m \rightarrow F^n, \quad A \in M_{n \times m}(F) \quad L(x) = Ax$$

$$L(x)_e = L_0^e x_e, \quad L(x)_e = L(x) = Ax = L_e^e x_e.$$

$\text{Hom}(F^n, F^m) \cong M_{m \times n}(F)$  - изоморфизм векторных пространств. В дальнейшем  $A$  отождествляется с  $L$ , пишем  $A_u^v$  вместо  $L_u^v$  ( $A$  в базисе  $u - v$ ).

**Определение 22.** Линейный оператор из  $V$  в  $V$  называется эндоморфизмом  $V$ . Множество эндоморфизмов  $V = \text{End}(V)$  - ассоциативная алгебра над  $f$

$+, * \alpha$  - поточечные операции,  $*$  - композиция.

$L, M, N \in \text{End}(V) : \quad L \circ (M + N) = L \circ M + L \circ N$  - следует из линейности  $L$

$v$  - базис  $V$ ,  $u = \dim V$

$$\theta_v : \text{End}(V) \rightarrow M_n(F)$$

$$\theta_v = L_v$$

**Утверждение.**  $\theta_v$  - биективно.

*Упражнение.* Построить обратное  $\theta_v$

$$\text{Лемма. } (M \circ L)_v = M_v \circ L_v$$

**Утверждение.**  $\theta_v$  - изоморфизм

$F$  - алгебра

$$\text{End} V \cong M_n(F)$$

—

**Теорема 1.11.1.**  $U \leq V$

$\forall L : V \rightarrow W, \quad U \leq \text{Ker} L, \exists! \tilde{L} : V \setminus U \rightarrow W$

$$\tau : \begin{array}{ccc} V \setminus U & \longrightarrow & W \\ \uparrow \pi_U & & \\ V & \xrightarrow{L} & W \end{array}.$$

$$\tau \circ \pi_U = L$$

$L$  - эпиморфизм  $\Rightarrow \tau$  - эпиморфизм

$\text{Ker} L = U \Rightarrow \tau$  - мономорфизм

*Доказательство.* Диаграмма коммутативна, следовательно,  $\tilde{L}$  строится однозначно. Пусть  $\tilde{L}(x+U) := L(x).y \in U \in \text{Ker} L : L(x+y) = L(x)+L(y) = L(x) \tilde{L}$  задано корректно (легко проверить, что оно линейно, единственность следует из коммутативности диаграммы).  $\tilde{L}(x+U) = L(x)$  - необходимо и достаточно коммутативности диаграммы.  $\tilde{L}(x+U) = 0_W \Leftrightarrow L(x) = 0 \Leftrightarrow x \in \text{Ker} L = U \Leftrightarrow x+U = 0+U = 0_{V \setminus U}$   
Для инъективности :  $\text{Ker} \tilde{L} = 0_{V \setminus U}$  □

**Теорема 1.11.2** (О гомоморфизме).  $L : V \rightarrow W$

$$V/\text{Ker} L \cong \text{Im} L.$$

*Доказательство.* Возьмем  $U = \text{Ker} L$  и заменим  $W$  на  $\text{Im} L$   $n = \dim \langle a_{*1}, \dots, a_{*n} \rangle \leq \dim F^m = m$ . Из линейной независимости строк следует, что  $m \leq n$  Таким образом  $m = n$ .

$n$  линейно независимых столбцов (строк) в  $n$ -мерном пространстве - базис и матрица  $A$  - матрица перехода  $C_{e \rightarrow a}$ , где  $a = (a_{*1}, \dots, a_{*n})$  - набор столбцов  $A$ . Следовательно,  $A \in GL_n(F)$  - множество обратных матриц. □

**Определение 23.** Ранг:

$$rk(v_1, v_2, \dots, v_n) = \dim \langle v_1, \dots, v_n \rangle,$$

$$rk L = \dim \text{Im} L$$

$$u_1, \dots, u_n - \text{базис } U, L : U \rightarrow V$$

$$rk L = rk((L(u))) = \dim \langle L(u_1), \dots, L(u_n) \rangle$$

$$A \in M_{m \times n}(F)$$

$$\text{Столбцовый ранг } A : rk A = rk(a_{*1}, \dots, a_{*m})$$

$$\text{Строчный ранг} : rk A = rk(a_{1*}, \dots, a_{n*})$$

или наибольшее количество независимых столбцов (строк).

**Лемма.**  $A \in M_{m \times n}$

1. столбцы  $A$  линейно независимы  $\Leftrightarrow$  столбцовый  $rk A = n$
2. столбцы  $A$  - система образующих в  $F^m \Leftrightarrow$  столбцовый  $rk A = m$
3. строки  $A$  линейно независимы  $\Leftrightarrow$  строчной  $rk A = m$



4. строки  $A$  - система образующих в  ${}^mF \Leftrightarrow$  строчной  $rkA = n$
5. столбцы являются базисом  $F^n \Leftrightarrow m = n =$  строчной  $rkA$
6. если столбцы и строки  $A$  линейно независимы  $\Leftrightarrow n = m$ , строки и столбцы - базисы,  $A$  - обратима.

Доказательство. (6)

из (1)  $\Rightarrow c.rkA = n$

$$n = \dim \langle a_{*1}, \dots, a_{*n} \rangle$$

□

10.10.2019

## 1.12 Лекция 12

**Лемма.**  $L : U \rightarrow V$  - линейное отображение.

$$rkL = c.L_U^V$$

Для любых базисов  $u, v$  пространств  $U, V$ .

Доказательство.

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{L} & V \\ \downarrow \varphi_u & & \downarrow \varphi_v \\ F^n & \xrightarrow{L_U^V} & F^m \end{array}$$

$$A \in M_{m \times n}(F)$$

$$ImA = \{Ax \mid x \in F^n\} = \{a_{*1}x_1 + \dots + a_{*n}x_n \mid x_i \in F\} = \langle a_{*1}, \dots, a_{*n} \rangle.$$

$rkA = c.rkA$  - ранг оператора умножения на  $A$ . Из диаграммы  $ImL \cong ImL_U^V \Rightarrow rkL = c.rkL_U^V$  □

**Лемма.**  $A \in M_{m \times n}(F)$

$$B \in GL_m(F), C \in GL_n(F)$$

$rkA = rkBAC$  - строчной или столбцовый.

Доказательство.  $L : F^n \rightarrow F^m$ - оператор умножения на  $A$ .  $A = L_e^e$ .

$B = C_{e \rightarrow v}, C = C_{e \rightarrow u}$ , где  $u, v$  - базисы пространств  $F^m, F^n$ .

$BAC = L_v^u$  Тогда  $c.rkA = c.rkBAC = rkL$ . Со столбцами все хорошо. Теперь со строками:  $r.rkA^T = c.rkA$

$$r.rk(BAC)^T = r.rk(A^T B^T C^T) \quad r.rk(BAC)^T = c.rkBAC$$

Тогда  $r.rkA^T = r.rkC^T A^T B^T$ . (Заметим, что  $(B^T)^{-1} = ((B^{-1})^T)$  Следовательно,  $B^T, C^T$  - произвольные обратимые матрицы. □

$$\text{Упражнение. } (AB)^T = B^T A^T$$

**Теорема 1.12.1** (PDQ - разложение, равенство базисов).  $L : U \rightarrow V$  - линейное отображений,

1. Существуют базисы  $u, v$  пространств  $U, V$  такие что

$$L_u^v = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Размер  $E = rkL$ .

2.  $\forall A \in M_{m \times n}(F) \exists P \in GL_m(F), Q \in GL_n(F) : A = PDQ$ , где  $D = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

3.  $crkA = r.kA$

*Доказательство.*  $(f_1, \dots, f_k)$  - базис  $Ker L$ . Дополним до базиса на пространства  $U : g \cup f = u$ . Тогда (см. Теорему о ядре и о,разе).  $L(g)$  - базис  $Im L$ . Дополним его до базиса  $v$  пространства  $V$ .

$$v = (L(g_1), \dots, L(g_l), v_{l+1}, \dots, v_n).$$

$$\begin{aligned} L(g_1)_v &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \\ &\vdots \\ L(g_l)_v &= \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$L(f_i) = 0 \text{ таким образом } L_u^v = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

□

**Определение 24.**  $W$  - множество матриц-перестановок (группа Вейля).

$$a_{*i} = e_{\sigma(k)}, \quad \text{где } \sigma : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\} \text{ - биекция.}$$

$B =$  - множество обратимых верхнетреугольных матриц. (борелевская подгруппа)  $B^-$  - множество обратимых нижнетреугольных матриц.

**Теорема 1.12.2** (разложение Брюа).

$$GL_n(F) = BWB = \{b_1 w b_2 \mid b_1, b_2 \in B, w \in W\}.$$

$w \in W : BwB$  - клетка Брюа.

*Доказательство.*  $a \in GL_n(F)$

$$\exists b, c \in B : bac \in W.$$

Индукция по  $n$

В первом столбце  $a$  выберем низший ненулевой элемент.

$$\begin{pmatrix} 1 & & * \\ 0 & 1 & \\ & & \ddots \end{pmatrix}.$$

$$ua = ()$$

Пусть  $a'$  - матрица, полученная из  $uav$  вычеркиванием  $i$ -ого столбца и  $j$ -строки. Легко видеть, что ее столбцы линейно независимы. Следовательно,  $a'$  - обратима. Тогда по ПИ  $\exists b', c' : b'a'c' \in W_{n-1}$ . Все получилось!

□

*Доказательство.* см конспект  $GL_n(F) = BWB$   
 $a \in GL_n(F)$

□

**Теорема 1.12.3** (разложение Гаусса).

$$GL_n(F) = WB^-B.$$

$w \in W : wB^-B$  - клетка Гаусса.

*Доказательство.* Докажем, что  $\forall w \in W : BwB \subset wB^-B$   
 $BWB = \bigcup_{w \in W} BwB \subset \dots$

**Лемма (1).**  $D = D_n(F)$  - множество обратимых диагональных матриц.  $U = U_n(F)$  - множество унитарных матриц. Тогда  $B = DU = UD$ .

Упражнение.  $a = \begin{pmatrix} \alpha_i & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}, \quad \alpha_i \neq \alpha_j, \text{ если } i \neq j \Rightarrow ab = ba \Rightarrow b \in D$

*Доказательство.*

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{b_{11}} & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & \cdots & \frac{1}{b_{nn}} \end{pmatrix}$$

□

**Лемма (2).**  $U = \prod_{i < j} X_{ij}$ , причем произведение берется в любом наперед заданном порядке.

*Доказательство.* Будет в теории групп

□

**Обозначение.**  $w \in W : U_w := \prod_{i < j, \sigma(i) > \sigma(j)} X_{ij}$ , где  $\sigma$  - перестановка соответствующая  $w$ . То есть  $w^{-1}X_{ij}w = X_{\sigma(i)\sigma(j)}$ .

**Теорема 1.12.4** (Приведенной разложение Брюа).  $B = \bigcup_{w \in W} U_w w D U$  При этом  $w, a$  также элементны из  $U_w, D, U$  определены по элементам из  $B$  из единственным образом.

*Доказательство.* □

**Следствие.**  $BwB \subset wB^{-1}B = w(w^{-1}U_w w)B \subset wU^{-}B \subset wB^{-}B$

*Доказательство.*  $BwB = U_w w B$  □

□

**Утверждение.**

$$BwB \cap Bw'B = \emptyset, \forall w \neq w'.$$

## 1.13 Лекция 13

15.10.2019 Доказательство теорем

## 1.14 Лекция 14

17.10.2019

*Разложение Гаусса.* Идея доказательства:  $a \in GL_n(F)$ ,  $wa \in U^{-}B$ . Найдем такое  $w$ .

**Определение 25.** Главная подматрица матрицы  $A$ - подматрица  $k \times k$  стоящая в левом верхнем углу матрицы  $A$ .

**Лемма.** Обратимость любой главной подматрицы не зависит от умножения на  $U^{-}$  слева и на  $U$  справа.

*Доказательство.*  $a^{(k)}$  - главная подматрица  $k \times k$  в  $a$ .

$$\begin{pmatrix} b & 0 \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(k)} & * \\ * & * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ba^{(k)} & * \\ * & * \end{pmatrix}.$$

Где  $b \in U^{-}F$  Обратимость  $a^{(k)}$  равносильно обратимости  $ba^{(k)}$ , так как  $b$  - обратима. □

**Лемма.**  $a \in U^{-}B \Leftrightarrow$  все главные подматрицы обратимы.

*Доказательство.* Доказываем следствие влево. Индукция по  $n$ . База:  $n = 1$  - очевидно  
Переход:

$$a = \begin{pmatrix} a^{(n-1)} & * \\ * & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -xa^{(n-1)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a^{(n-1)} & * \\ x & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^{(n-1)} & * \\ 0 & * \end{pmatrix}.$$

Дальше применим предположение индукции к  $a^{(n-1)}$ . Она раскладывается в произведение верхне- и нижнетреугольной.

В обратную сторону следует из прошлой леммы. Действительно, у обратимой верхнетреугольной матрицы все главные подматрицы обратимы, а умножение слева на обратимые нижнетреугольные не меняет их обратимость.  $\square$

**Лемма.**  $\forall a \in GL_n(F) \exists w \in W$  : все подматрицы в  $wa$  обратимы. По условию  $a^{(n-1)}$  обратима,

*Доказательство.* Индукция по  $k$ . Докажем, что существует перестановка  $a \in GL_n(F)$  такая, что главные подматрицы размера не более  $k \times k$  обратимы.

$k = 1$

$$a_{*1} = 0 \Rightarrow \exists i : a_{ij} \neq 0.$$

Меняем  $i$ - строку с первой.

Переход:

$$a = \begin{pmatrix} a^{(k)} & * \\ * & * \end{pmatrix}.$$

По индукционному предположению все главные подматрицы в  $a^{(k)}$  обратимы. Все столбцы линейно независимы, следовательно, ранг матрицы  $\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k+1} \\ & \ddots & \\ a_{n1} & \cdots & a_{nk+1} \end{pmatrix} =$

$k+1$   $k+1$  - мерное подпространство  $U$  в  $^{k+1}F$ . А первые  $k$  строк этой матрицы линейно независимы.  $X = b_1, \dots b_k, Y = b_1, \dots b_n, \quad b_i = (a_{i1}, \dots a_{ik+1})$ .

$X$  - линейно независимый,  $\langle y \rangle = U, \dim U = k+1$ .

$$\exists Z : X \geq X \geq Y, \text{ где } Z - \text{ базис } U..$$

$$|Z| = k+1 \Rightarrow Z = b_1, \dots b_k, b_i, i > k..$$

Переставляем  $i$ -ю строку на  $k+1$  место. У получившейся матрицы первые  $k$  главных подматриц равны главным подматрицам в  $a$ , а строки  $k+1$ -й строки главной подматрицы линейно независимы. Следовательно, она независима.  $\square$

$wa \in B^- B$ . Домножая на  $B, B^-$ , получим, что хотели.  $\square$

**Теорема 1.14.1** (Кронекера-Капелли). Система линейных уравнений  $Ax = b$  имеет хотя бы одно решение тогда и только тогда, когда  $rk A = rk(Ab)$ , где  $(Ab)$  - расширенная матрица.

*Доказательство.*

$$rk A = rk(Ab) \Leftrightarrow \langle a_{*1}, \dots \rangle = \langle a_{*1}, \dots, a_{*n}, b \rangle \Leftrightarrow b \in \langle a_{*1}, \dots, a_{*n} \rangle \Leftrightarrow \text{система имеет решение.}$$

□

# Chapter 2

## Начала теории групп

### 2.1 Лекция 15

**Определение 26.** Подмножество  $H \subset G$  называется подгруппой, если  $H$  – группа относительно операции, заданной в  $G$ .

$$H \leq G.$$

**Лемма.**  $H \subset B$   $H$  - подгруппа  $\Leftrightarrow \forall h, g \in H : gh, g^{-1} \in H$ .

**Утверждение.**  $G, H$  - группы.

$$G \times H = \{(g, h) \mid g \in G, h \in H\}.$$

$$(g, h) \cdot (g', h') := (g \cdot g', h \cdot h').$$

**Определение 27.**  $\varphi: X \rightarrow Y, (X, *), (Y, \dots) -$

$\varphi$  - гомоморфизм групп, если:

$$\varphi(x_1 * x_2) = \varphi(x_1) \cdot \varphi(x_2), \quad \forall x_1, x_2 \in X.$$

Изоморфизм - биективный гомоморфизм.

**Лемма.**  $G, H \leq F$

1.  $G \cap H = \{1\}$

2.  $G \cdot H = F$

3.  $\forall g \in G, h \in H : gh = hg$

Тогда  $F \cong G \times H$ .

*Доказательство.*  $\varphi : G \times H \rightarrow F$

$$\varphi(g, h) = g \cdot h$$

$$\varphi((g, h) \cdot (g', h')) = \varphi(gg', hh') = gg'hh'.$$

$$\varphi(g, h) \cdot \varphi(g', h') = ghg'h'.$$

(1)  $\Leftrightarrow \varphi$  - сюръективно.

$$\varphi(g, h) = \varphi(g', h') \Leftrightarrow gh = g'h' \Leftrightarrow g'^{-1}g = h'h^{-1} = 1 \Rightarrow g' = g, h' = h.$$

□

## 2.2 Лекция 16

22.10.2019

**Пример.**  $\ln : \mathbb{R}_{>0}^* \rightarrow (\mathbb{R}, +)$

$\ln ab = \ln a + \ln b$  - гомоморфизм.

**Определение 28.**

$\varphi G \rightarrow H$  - гомоморфизм.

$$Im\varphi = \{\varphi(g) \mid g \in G\}.$$

$$Ker\varphi = \varphi^{-1}1 = \{g \in G \mid \varphi(g) = 1\}.$$

**Лемма.**  $Im\varphi$  и  $Ker\varphi$  - подгруппы.

*Доказательство.*

$$a, b \in Ker\varphi.$$

$$\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) = 1 \Leftrightarrow ab \in Ker\varphi.$$

$$\varphi(a^{-1}) = \varphi(a)^{-1} = 1 \Rightarrow a^{-1} \in Ker\varphi.$$

□

**Лемма.**

$\varphi(g) = h, \quad \varphi : G \rightarrow H$  - гомоморфизм.

$$\varphi^{-1} = \underbrace{gKer\varphi}_{\text{левый смежный класс по ядру } \varphi} = \underbrace{Ker\varphi g}_{\text{правый}}.$$

*Доказательство.*  $\varphi(x) = h = \varphi(g) \Leftrightarrow \varphi\varphi^{-1} = 1 \Leftrightarrow \varphi(xy^{-1}) = 1 \Leftrightarrow xy^{-1} \in Ker\varphi \Leftrightarrow x \in Ker\varphi g$

□

**Определение 29.**  $H \leq G$

$H$  называется нормальной подгруппой, если  $gH = Hg \quad g \in G. (H \trianglelefteq G)$

*Замечание.*  $g^{-1}Hg = H \quad \forall g \in G \Leftrightarrow g^{-1}Hg \subseteq H \quad \forall g \in G$



**Лемма.**  $H \leq G$

$$g_1H \cap g_2H \neq \emptyset \Leftrightarrow g_1H = g_2H.$$

*Доказательство.*  $x \in g_1H \cap g_2H \Rightarrow x = g_1h_1 = g_2h_2, \quad h_1, h_2 \in H$ . Тогда  $g_1 = g_2(h_2h_1^{-1}) \Rightarrow g_1H = g_2(h_2h_1^{-1})H$ .  $\square$

**Следствие.**  $G = \bigsqcup_{g \in X} gH$ , где  $X$  - множество представителей левых смежных классов

по  $H$ .

$$g_1 \stackrel{H}{\sim} g_2 \Leftrightarrow g_1^{-1}g_2 \in H$$

**Лемма.**

$$|g_1H| = |g_2H|, \quad \forall g_1, g_2 \in G, H \leq G.$$

*Доказательство.*

$$\left( \begin{array}{l} g_1H \rightarrow g_2H \\ x \mapsto g_2g_1^{-1}x \end{array} \right).$$

Обратная  $y \mapsto g_1g_2^{-1}y$   $\square$

**Теорема 2.2.1** (Лагранж).  $G$  - конечна группа. Тогда  $|G| = |H||G : H|$ , где  $|G : H|$  - количество левых смежных классов  $G$  по  $H$ .  $|G : H|$  - индекс  $H$  в  $G$ .

*Доказательство.* Из прошлой леммы и следствия  $\square$

**Следствие.** Если  $p = |G| \in \mathbb{P}$ , то  $\forall g \in G \setminus 1 : G = \{1, g, \dots, g^{p-1}\} \cong \mathbb{Z}_p$

*Доказательство.*  $\{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\} \leq G = \langle g \rangle$ .

$|\langle g \rangle|$  делит  $p$  и больше единицы, так как содержит единицу и  $g \neq 1$ . Следовательно,  $|\langle g \rangle| = p$ .

Докажем, что все элементы  $1, g, \dots, g^{p-1}$  различны. Рассмотрим  $0 \leq k, l \leq p-1$ . Пусть  $g^k = g^l \Rightarrow g^{k-l} = 1$ . При  $k-l \neq 0$ ,  $g^n = g^{m(k-l)+r} = g^r, \quad r < k-l \leq p-1$ . Тогда бы  $\{1, g, \dots, g^{k-l-1}\} = \langle g \rangle$ . Из чего следует  $|\langle g \rangle| < p$ . Противоречие.

Рассмотрим  $k \in [0, p-1]$ .  $g^p = g^k \Leftrightarrow g^{p-k} = 1 \Rightarrow k = 0 \Rightarrow g^p = 1$ .

Теперь проверим изоморфность.  $\varphi : \mathbb{Z}_p \rightarrow G, \varphi(k) = g^k$   $\square$

**Определение 30.** Группа, порожденная одним элементом, называется циклической.

**Утверждение.** Любая циклическая группа изоморфна  $\mathbb{Z}$  или  $\mathbb{Z}_n$ .

*Доказательство.*  $G = \{g^m \mid m \in \mathbb{Z}\}$ . Разберем два случая:

1.  $g^m \neq 1 \forall m \in \mathbb{N} \Rightarrow g^m \neq 1 \forall m \neq 0$ .

$$\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow G, \quad \varphi(m) = g^m.$$

$$\varphi(m+k) = g^{m+k} = g^m g^k = \varphi(m)\varphi(k).$$

2. Пусть  $n$  - наименьшее натуральное число, такое что  $g^n = 1$ .

$$\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow G, \quad \varphi(m) = g^m \text{ сюръективно ..}$$

$$g^m = 1 \Leftrightarrow g^{nk+r} = 1 \Leftrightarrow g^r = 1 \Rightarrow r = 0$$

$$\text{Ker}\varphi = \{m \mid g^m = 1\} = n\mathbb{Z}.$$

□

**Определение 31.** Порядок  $g \in G$  - наименьшее натуральное число, такое что  $g^n = 1$ .  $\text{ord}(g) = |\langle g \rangle|$

**Утверждение** (из теоремы Силова).  $|G| = p^m$ ,  $p \nmid m$ . Тогда  $\exists H \leq G : |H| = p^k \forall h \in H \setminus 1$ .

$\text{ord}(h \mid p^k)$ , следовательно,  $h^{p^l} = 1 \Rightarrow (h^{p^{l-1}})^p = 1$

## 2.3 Лекция 17

24.10.2019

$G$  - группа.

**Определение 32.**  $S \subseteq G$

$\langle S \rangle$  - наименьшая подгруппа содержащая  $S$ .

**Утверждение.**  $\langle S \rangle = \{S_1^{n_1} \cdot \dots \cdot S_k^{n_k} \mid k \in \mathbb{N}, S_i \in S, n_i \in \mathbb{Z}\}$ , для абелевой  $:s_i \neq s_j$  при  $j \neq i$ .

**Определение 33.**  $s^g := g^{-1}sg$

*Замечание.*  $(s^g)^h = s^{g^h}$   
 $h(gS) = {}^h g S$

**Свойства.**

$$1. (s_1 s_2)^g = s_1^g s_2^g$$

$$2. (s^g)^{-1} = (s^{-1})^g$$

$s \mapsto s^g$  - автоморфизм  $G$ .

**Определение 34.**  $H \leq G$

$$H^G = \langle h^g \mid h \in H, g \in G \rangle - \text{нормальное замыкание } H \text{ в } G.$$

Нормальное замыкание равно наименьшей нормальной подгруппе в  $G$ , содержащей  $H$ .

$\langle S \rangle^G$  - наименьшая нормальная подгруппа, содержащая  $S$ .

$s^g = g^{-1}sg$  - сопряженный с  $s$  при помощи  $g$ .

$$H^g = \langle h^g \mid h \in H \rangle - \text{подгруппа, сопряженная с } H \text{ при помощи } g.$$

**Определение 35.**  $aba^{-1}b^{-1} = [a, b]$  – коммутатор элементов  $a, b$ .

*Замечание.*  $ab = ba \Leftrightarrow aba^{-1}b^{-1} = 1$

**Утверждение.**  $\varphi : G \rightarrow A$  – гомоморфизм в абелеву группу.

$$\varphi([g, h]) = 1$$

Тогда  $[G, G] = \langle [g, h] \mid h, g \in G \rangle \subseteq \text{Ker}\varphi$  – коммутант  $G$ .

$$[g, h]^f = [g^f, h^f]$$

**Утверждение.**  $[a, b]^{-1} = [a, b]$

**Определение 36.** Центр группы –  $\text{Center}(G) = Z(G) := \{c \in G \mid cg = gc \forall g \in G\}$

**Обозначение.**

$G/H = \{gH \mid g \in G\}$  – множество левых смежных классов.

$H \setminus G = \{Hg \mid g \in G\}$  – множество левых смежных классов.

$$H \trianglelefteq G \quad (H^g = H \forall g \in G)$$

**Определение 37.** Фактор-группа  $G/H$  – множество смежных классов по  $H$  с операцией  $(g_1H)(g_2H) = g_1g_2H$ .

*корректность определения.*

$$g_1' \in g_1H \Rightarrow g_1'h_1.$$

$$g_2' \in g_2H \Rightarrow g_2'h_1.$$

$$g_1 \mid + g_2 \mid = g_1h_1g_2h_2 = g_1g_2g_2^{-1} = (g_1g_2)(g_2^{-1}h_1g_2)h_2 \in g_1g_2H.$$

□

**Определение 38.**  $\pi_H : G \rightarrow G/H, g \mapsto gH$

$\pi_H$  – эпиморфизм,  $\text{Ker}\pi_H = H$

**Теорема 2.3.1** (универсальное свойство факторгруппы).  $H \trianglelefteq G$

Для любого гомоморфизма  $\varphi : G \rightarrow F$ , такого что  $H \leq \text{Ker}\varphi \exists! \bar{\varphi} : G/H \rightarrow F$  коммутативна для диаграммы

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{\pi_H} & G/H \\ \downarrow \varphi & & \downarrow \exists! \bar{\varphi} \\ F & & F \end{array}$$

**Теорема 2.3.2.**  $\varphi G \rightarrow F$

$$G/\text{Ker}\varphi \cong \text{Im}\varphi.$$

*Доказательство.* Заменим  $F$  на  $Im\varphi$ .

$$\varphi' \rightarrow Im\varphi \quad Ker\varphi' = Ker\varphi.$$

По прошлой теореме существует единственное:

$$\hat{\varphi}: \begin{array}{ccc} G/Ker\varphi & \rightarrow & Im\varphi \\ \uparrow \pi & & \uparrow \varphi' \\ G & & G \end{array}.$$

$\varphi$  - сюръективно. Следовательно,  $\varphi'$  - сюръективно.

$$gKer\varphi \in Ker\hat{\varphi} \Leftrightarrow \hat{\varphi}(gKer\varphi) = 1 \Leftrightarrow$$

$$\varphi(g) = 1 \Leftrightarrow gKer\varphi = Ker\varphi = 1_{G/Ker\varphi}. \text{ Следовательно, } \hat{\varphi} \text{ - инъективно. } \quad \square$$

**Пример.**  $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_n, \quad \varphi(x) = x \bmod n.$

$$Ker\varphi = n\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$$