

Конспект по алгебре за I семестр бакалавриата  
Чебышёва СПбГУ (лекции Степанова Алексея  
Владимировича)

Тамарин Вячеслав

December 3, 2019

# Contents

# 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)

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

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

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

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

**Exs.**

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

### Designation.

- $\cdot$  – 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)

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

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

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

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

**Exs.**

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

**Def 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.  $x \cdot 1_F = x$

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

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

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

**Exs.**

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

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

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

**Def 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 "+")

**Def 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  $x$

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

**Def 13.** Транспонирование матрицы.

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

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

*Note.* 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

**Designation.**

$a_{i*}$  -  $i$ -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

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

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

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

**Def 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:  $\varphi(1) = 1$

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

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

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

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

*Note.* Изоморфизм – биективный гомоморфизм.

**Def 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.

*Note.*  $U \subset V$

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

**Lemma.**  $U \subseteq V$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Базис – система образующих.

**Designation.**  $F^I$  – 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  $f : I \rightarrow V$   
 $i \mapsto f_c$

**Def 20.**  $v \in {}^I V$

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

**Theorem 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)



*Proof.* (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.

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

$$x \in V \setminus$$

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

$$va + xa_x = 0$$

$$a \neq 0$$

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

$$\text{Значит } a_x \neq 0$$

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

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

□

**Lemma.** (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.

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

**Theorem 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  $V : X \leq Z \leq Y$

*Proof.*  $\mathbb{A}$  – 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

**Statement.**

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

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

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

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

□

**Corollary.**

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

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

25.09.2019

## 1.8 Лекция 8

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

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

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

**Lemma.**

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

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

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

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

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

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

□

**Statement.**  $u, v$  - 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  $u$ .

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

*Proof.* Положим  $a_{*k} = (u_k)_v \Rightarrow u_k = v a_{*k} \Rightarrow u = vA$ .

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

Далее:

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

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

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

□

**Corollary.**  $v$  - базис  $V$

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

$f(A) = vA$  - биекция.

*Proof.*

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

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

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

□

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

**Corollary.**  $u, v$  - базисы  $V$

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

*Proof.*

$$x = u x_u = v x_v$$

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

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

□

**Corollary.** (Матричные линейные отображения)

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

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

При этом  $(L_u^v)_{*k} = L(u_k)_v$

*Note.*

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

$$L : U \rightarrow V$$

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

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

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

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

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

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

*Proof.*

$$x = ux_u$$

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

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

Положим  $L_u^v := L(u)_v$ .

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

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

□

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

26.09.2019

## 1.9 Лекция 9

**Exs.**

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

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

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

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

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

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

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

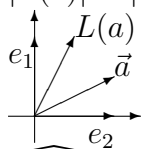
$$v = (1, t, \frac{t^2}{2}, \dots, \frac{t^n}{n!}, \dots).$$

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

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

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

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



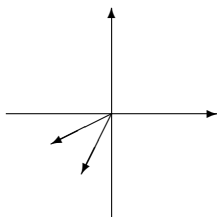
$$a, L(a) = \varphi$$

$e = (e_1, e_2)$ - базис

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

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

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



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

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

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

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

$u, u' - \text{базис } U$

$v, v' - \text{базис } V$

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

*Proof.*

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

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

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

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

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

□

*Note.*

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

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

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

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

Для любого векторного пространства  $V$ :

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

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

*Proof.*

$$L(ua) := va$$

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

□

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.

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

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

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

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

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

по другому

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

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

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

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

$L : U \rightarrow V$  - линейное отображение

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

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

**Lemma.**

$$ImL \leq V$$

$$KerL \leq U$$

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

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

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

*Proof.*  $u = (u_1, \dots, u_k)$  - 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.  $\square$

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

$$U, V \leq W$$

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

*Proof.*  $\triangleleft$  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

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

Простейший базис:

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

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

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

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

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

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

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

**Def 22.** Линейный оператор из  $V$  в  $V$  называется эндоморфизмом  $V$ . Множество эндоморфизмов  $V = End(V)$  - ассоциативная алгебра над  $f$

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

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

$v$  - базис  $V$ ,  $u = \dim V$

$$\theta_v : End(V) \rightarrow M_n(F)$$

$$\theta_v = L_v$$

**Statement.**  $\theta_v$  - биективно.

*Practice.* Построить обратное  $\theta_v$

**Lemma.**  $(M \circ L)_v = M_v \circ L_v$

**Statement.**  $\theta_v$  - изоморфизм

$F$  - алгебра

$$EndV \cong M_n(F)$$

—



**Theorem 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

*Proof.* 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 :  $\text{Ker} \tilde{L} = 0_{V \setminus U}$  □

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

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

*Proof.* 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. □

**Def 23.** Ранг:

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

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

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

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

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

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

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

или наибольшее количество независимых столбцов (строк).

**Lemma.**  $A \in M_{m \times n}$

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.

*Proof.* (6)

из (1)  $\Rightarrow c.rkA = n$

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

□

10.10.2019

## 1.12 Лекция 12

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

$rkL = c.L_U^V$

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

*Proof.*

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

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

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

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

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

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

$rkA = rkBAC$  - строчной или столбцовый.

*Proof.*  $L : F^n \rightarrow F^m$ - 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. □

*Practice.*  $(AB)^T = B^T A^T$

**Theorem 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.  $c.rkA = r.rkA$

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

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

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

$\vdots$

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

$\vdots$

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

□

**Def 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.

**Theorem 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.

*Proof.*  $a \in GL_n(F)$

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

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!

□

*Proof.* см конспект  $GL_n(F) = BWB$

$a \in GL_n(F)$

□

**Theorem 1.12.3** (разложение Гаусса).

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

$w \in W : wB^-B$  - клетка Гаусса.

*Proof.* Докажем, что  $\forall w \in W : BwB \subset wB^-B$

$$BWB = \bigcup_{w \in W} BwB \subset \dots$$

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

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

*Proof.*

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

□

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

*Proof.* Будет в теории групп

□

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

**Theorem 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.

*Proof.* □

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

*Proof.*  $BwB = U_w w B$  □

□

**Statement.**

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

## 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  $w$ .

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

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

*Proof.*  $a^{(k)}$  - 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. □

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

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

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

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

Далее 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.  $\square$

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

*Proof.* 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  $\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1k+1} \\ & \ddots & \\ a_{n1} & \dots & a_{nk+1} \end{pmatrix} =$

$k+1$   $k+1$ - 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.  $\square$

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

*Proof.*

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

$\square$

# Chapter 2

## Начала теории групп

### 2.1 Лекция 15

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

$$H \leq G.$$

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

**Statement.**  $G, H$  - группы.

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

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

**Def 27.**  $\varphi: X \rightarrow Y, (X, *), (Y, \cdots) -$ .

$\varphi$  - 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.

**Lemma.**  $G, H \leq F$

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

2.  $G \cdot H = F$

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

Тогда  $F \cong G \times H$ .

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

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

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

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

(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

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

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

**Def 28.**

$\varphi G \rightarrow H$  - гомоморфизм.

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

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

**Lemma.**  $\text{Im} \varphi$  и  $\text{Ker} \varphi$  - подгруппы.

*Proof.*

$$a, b \in \text{Ker} \varphi.$$

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

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

□

**Lemma.**

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

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

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

□

**Def 29.**  $H \leq G$

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

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



**Lemma.**  $H \leq G$

$$g_1H \cap g_2H \neq 0 \Leftrightarrow g_1H = g_2H.$$

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

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

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

**Lemma.**

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

*Proof.*

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

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

**Theorem 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  $G$ .

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

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

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

$|\langle g \rangle|$  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.  $\varphi : \mathbb{Z}_p \rightarrow G, \varphi(k) = g^k$   $\square$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

□

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

**Statement** (из теоремы Силова).  $|G| = p^m$ ,  $p \nmid m$ . Тогда  $\exists H \leq G : |H| = p^k \forall k \in H \setminus 1$ .  
 $\text{ord}(h \mid p^k)$ , следовательно,  $h^{p^l} = 1 \Rightarrow (h^{p^{l-1}})^p = 1$

## 2.3 Лекция 17

24.10.2019

$G$  - группа.

**Def 32.**  $S \subseteq G$

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

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

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

*Note.*  $(s^g)^h = s^{gh}$

$h(gS) = {}^h g S$

**Property.**

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

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

$s \mapsto s^g$  - автоморфизм  $G$ .

**Def 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  $g$ .

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

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

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

**Statement.**  $\varphi : G \rightarrow A$  – 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  $G$ .

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

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

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

**Designation.**

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

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

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

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

*корректность определения.*

$$g'_1 \in g_1H \Rightarrow g'_1h_1.$$

$$g'_2 \in g_2H \Rightarrow g'_2h_1.$$

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

□

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

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

**Theorem 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

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

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

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

*Proof.* 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.

□

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

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

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

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

## 2.4 Лекция 18

**Ex.**

$$U_n(F) = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & & * \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \right\}.$$

Обозначим

$$U_n(k) = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & * \\ 0 & 1 & 0 & \dots & & * \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \\ \vdots & & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & & 1 \end{pmatrix} \right\} = \{a \mid a_{ij} = 1, a_{ij} = 0, \forall i \neq j, j - i < k\}.$$

Матрица трансвекций:

$$t_{ij}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \alpha & \dots & 0 \\ 0 & & \ddots & & 0 \\ 0 & & 0 & & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда  $U_n^{(k)}(F) = U_n^{(k)} = \langle t_{ij}(\alpha) \mid j - i \geq k, \alpha \in F \rangle$  - группа.

**Lemma.**  $U_n^{(k)} \setminus U_n^{(k-1)} \cong \underbrace{F \times \dots \times F}_{n-k}, \quad F = (F, +)$ . Проверим, что есть гомоморфизм,

и применим теорему о гомоморфизме.

*Proof.*

$$\varphi : U_n^k \rightarrow F^{n-k}, \quad \varphi(a) = (a_{i-k+1}, \dots, a_{n-k+1})^T.$$

Заметим, что  $\varphi$  - сюръективна,  $\varphi^{-1}(e) = U_n^{k+1}$ .

$$a, b \in U_n^{(k)}, \quad (a, b)_{i-k+1} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot b_{i-k+1+j} = b_{i-k+1} + a_{i-k+1}.$$

Тогда  $\varphi(a \cdot b) = \varphi(a) + \varphi(b)$ . Следовательно,  $\varphi$  - гомоморфизм.  $\square$

**Def 39.**  $[a, b] = aba^{-1}b^{-1}$  - коммутатор.

$H, K \leq G$ ,  $[H, K] := \langle [h, k] \mid h \in H, k \in K \rangle$  - коммутант.

**Statement.**  $[h, k]^g = [h^g, k^g] \Rightarrow [G, G] \trianglelefteq G$ .

**Statement.**  $\varphi : G \rightarrow A$  - гомоморфизм.

$A$  - абелева  $\Rightarrow [G, G] \subseteq \text{Ker} \varphi$ .

*Proof.*

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

Тогда

$$[g, h] \in \text{Ker} \varphi, \quad \forall g, h \in G.$$

Из этого следует, что  $[G, G] \subseteq \text{Ker} \varphi$ .  $\square$

**Corollary.**  $[U_n^{(k)}, U_n^{(k)}] \leq U_n^{(k+1)}$

**Lemma.**  $[U_n^{(k)}, U_n^{(m)}] = U_n^{(m+k)}, ( \text{если } l \geq n, \text{ то } U_n^l := e )$ .

*Proof.*

$$[t_{ij}(\alpha), t_{jh}(\beta)] = t_{ih}(\alpha\beta), \quad i, j, h - \text{различны.}$$

$\forall i, h : h - i \geq m :$

$$\exists j : j - i \geq k, h - j \geq m.$$

Следовательно, любая образующая (и сама группа) содержится:  $U_n^{(m+k)} \subseteq [U_n^{(m)}, U_n^{(k)}]$ .

В обратную сторону:

$$\begin{aligned} [xy, z] &= xyz y^{-1} x^{-1} z^{-1} = x(yzy^{-1} z^{-1} x^{-1} z^{-1} = \\ &= x[y, z] x^{-1} x z x^{-1} z^{-1} = [y, z]^{x^{-1}} \cdot [x, z] \end{aligned}$$

Заметим, что

$$[t_{ij}(\alpha), t_{lh}(\beta)] = e, \quad \text{если } j \neq l, h \neq i.$$

Тогда

$$t_{ij}(\alpha) \in U_n^{(k)}, \quad t_{hk}(\beta) \Rightarrow [t_{ij}(\alpha), t_{lh}(\beta)] \in U^{(m+k)n}.$$

Посчитаем

$$\underbrace{[t_{ij}(\alpha), t_{li}(\beta)]}_{j \neq l} = [t_{li}(\beta), t_{ij}(\alpha)]^{-1} = t_{lj}(\beta\alpha)^{-1} = t_{lj}(-\beta\alpha).$$

Так как  $U_n^{(k+m)}$  - нормальная подгруппа, то есть трансвекцию во включении 2.4 можно заменить на произведение трансвекций, то есть на любые элементы  $U_n^{(k)}, U_n^{(m)}$ . Доказали обратное утверждение.  $\square$

## 2.5 Лекция 19

### 2.5.1 Поговорим о коммутаторах

**Lemma.**

$$H = \langle X \rangle \leq G = \langle Y \rangle.$$

Тогда

$$H \trianglelefteq G \iff x^y \in H \quad \forall x \in X, y \in Y.$$

*Proof.* В правую сторону очевидно (по определению), обратно: нужно доказать, что  $h^g \in H \quad \forall h \in H, g \in G$ . Разложим  $g = y_1 \cdot \dots \cdot y_m$ ,  $y_i = U \cup Y^{-1}$ .

Индукция по  $m$ . При  $m = 0 : g = 1 \wedge h^1 = h \in H$ .

Переход:  $m \geq 1$ . По ИП  $h^{y_1 \dots y_{m-1}} \in H$ ,  $h = x_1 \dots x_n$ ,  $x_i \in X \cup X^{-1}$ .

$$h^y = (h^{y_1 \dots y_{m-1}})^y = x_1^{y_m} \dots x_n^{y_m}.$$

$x_i \in X \Rightarrow x_i \in H$  по условию.

$$x_i \in X^{-1} \Rightarrow ((x_i)^{-1})^{y_m} = ((x^{-1})^{y_m})^{-1} \in H.$$

□

*Note.* В определении нормальной подгруппы вместо  $h^g$  также можно написать  $[g, h]$ , так как для  $h \in H, g \in G$

$$[g, h] = ghg^{-1}h^{-1} = h^{g^{-1}}h \in H \iff h^{g^{-1}} \in H.$$

$g^{-1}$  можно заменить на  $g$ .

Аналогично в лемме можно заменить  $x^y$  на  $[x, y]$ .

**Property** (Формулы для коммутаторов). 1.  $[x, y] = [y, x]^{-1}$

$$2. [xy, z] = {}^x[y, z] \cdot [x, z]$$

$$3. [x, y]^z = [x^z, y^z]$$

**Lemma.**  $H, K \leq G$ ,  $[H, K] \trianglelefteq \langle H \cup K \rangle$

$h \in H, k \in K, x \in H$  (для  $x \in K$  аналогично).

$$[h, k]^x = {}^{x^{-1}}[h, k] = [h^{-1}h, k]^{-1} \cdot [x^{-1}, k]^{-1} \in [H, K].$$

### 2.5.2 Возвращаемся к матрицам

$$U_n^{(k)}(F) = U_n^{(k)} = \{a \in M_n(F) \mid a_{ii} = 1, a_{ij} \forall i \neq j, j - i < k\} = \langle t_{ij}(\alpha) \mid \alpha \in F, j - i \geq k \rangle.$$

**Lemma.**  $U_n^{(k)} \trianglelefteq U_n = U_n^{(1)}$

*Proof.* Докажем, что  $a = [t_{ij}(\alpha), t_{hl}(\beta)] \in U_n^{(k)} \quad \forall j - i \geq k. \quad l > h$

Первый случай  $i \neq h, i \neq l \Rightarrow a = e \in U_n^{(k)}$ .

Второй случай  $j = h \Rightarrow i \neq j : \quad a = t_{il}(\alpha\beta), l - i \geq k + 1$ . Тогда  $a \in U_n^{(k+1)} \leq U_n^{(k)}$ .

Третий случай  $j \neq h, i = l : \quad a = [t_{hj}(\beta), t_{ij}(\alpha)]^{-1} = t_{hj}(\beta\alpha)^{-1} = t_{hj}(-\beta\alpha). \quad j - h \geq k + 1 \Rightarrow t_{hj}(-\beta\alpha) \in U_n^{(k+1)}.$   $\square$

**Lemma.** Пусть  $\preceq$  - отношение линейного порядка на  $P = \{(i, j) \mid 1 \leq i < j \leq n\}$ .

$$U_n(F) = \left\{ \prod_{(i,j) \in P} t_{ij}(\alpha_{ij}) \mid \alpha_{ij} \in F \right\}.$$

*Note.*  $H \trianglelefteq G, \quad x, y \in G : \quad xH = yH \Leftrightarrow y^{-1}x \in H \Leftrightarrow x \equiv y \pmod{H}$

*Proof.* Рассмотрим элемент  $h \in U_n(F)$ . Докажем по индукции (по  $k$ ), что

$$h \equiv \prod_{\substack{(i,j) \in P \\ 0 \leq j - i < k}} t_{ij}(\alpha_{ij}) \pmod{U_n^{(k)}}.$$

При  $k = 1$  утверждение очевидно, доказывать нечего.

Переход:  $k - 1 \rightarrow k$

По предположению индукции

$$h \equiv \prod_{0 < j - i < k - 1} t_{ij}(\alpha_{ij}) \pmod{U_n^{(k-1)}} = \prod_{0 < j - i < k - 1} t_{ij}(\alpha_{ij}) \cdot \prod_{j - i = k - 1} t_{ij}(\alpha_{ij}) U_n^{(k)}$$

Так как коммутатор  $[u, t_{i \ i+k-1}(\alpha)] \in U_n^{(k)} \quad \forall u \in U_n$ . То есть  $[u, t_{i \ i+k-1}(\alpha)] \equiv 1 \pmod{U_n^{(k)}}$ . Это равносильно

$$ut_{i \ i+k-1}(\alpha) \equiv t_{i \ i+k-1} \cdot u \pmod{U_n^{(k)}}.$$

Получаем

$$h \equiv \prod_{0 < j - i < k} t_{ij}(\alpha_{ij}) \pmod{U_n^{(k)}}.$$

$\square$

Введем обозначения:  $w$  - матрица перестановки.

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

$$\begin{pmatrix} \bullet & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \bullet \end{pmatrix} \in D.$$

$$B_n = D_n U_n = U_n D_n \quad (\forall d \in D_n : U_n^d = U_n).$$

$B_n w B_n = U_n D_n w B_n$ , где  $U_w = \langle t_{ij}(\alpha) \mid \alpha \in F, j > i, t_{ij}(\alpha)^w \in U_n^- \rangle$  - ниже треугольные.

$$U_w = \langle t_{ij}(\alpha) \mid j > 1, \alpha \in F, t_{ij}(\alpha)^w \in U_n \rangle.$$

**Corollary.** Матрица  $U_n$  представляется в виде произведения трансвекций в любом порядке.  $U_n = U_w \cdot \bar{U}_w$

*Proof.* □

**Corollary** (приведенное разложение Брюа).  $B_n w B_n \subseteq w B_n^- B_n$

*Proof.*  $B_n w B_n = U_n w B_n = w U_w w^{-1} \bar{U}_w w B_n = w \underbrace{U_w^w}_{\subseteq U_n^-} \underbrace{\bar{U}_w^w B_n}_{\subseteq U_n} \subseteq w U_n^- B_n = w B_n^- B_n$  □

## 2.6 Лекция 20

### 2.6.1 Симметрическая группа

**Def 40** (Перестановка).  $\sigma \in S_n \iff \sigma : \{1, \dots, n\} \xrightarrow{\sim} \{1, \dots, n\}$  Табличная запись перестановки:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & \dots & n \\ i_1 & \dots & i_n \end{pmatrix}, i_j \neq i_k (j \neq k).$$

Циклическая запись перестановки:

$$\tau = (j_1, \dots, j_n) \iff \tau(j_1) = j_2, \tau(j_2) = j_3, \dots, \tau(j_{n-1}) = j_n, \tau(j_n) = j_1, \quad \tau(i) = i, \forall i \neq j_k.$$

**Def 41.**  $(j_1 \dots j_n)$  и  $(k_1 \dots k_m)$  независимы, если  $j_h \neq j_l \quad \forall h, l$ .

**Lemma.** Любая перестановка равна произведению независимых (композиции) циклов.

**Def 42.** Циклический (цикленный) тип перестановки – набор из длин независимых циклов, в произведение которых раскладывается перестановка.

*Note.* В определении слово "набор" подразумевает мультимножество, то есть порядок не важен, но элементы повторяются.

**Ex.**  $(12)(345) \in S_6$  записывают  $2 + 3$ .

**Lemma.**

$$\sigma(i_1, i_2, \dots, i_k) \sigma^{-1} = (\sigma(i_1), \dots, \sigma(i_k)).$$

Следовательно, сопряжение не меняет циклический тип.



*Proof.*  $\sigma(i_1 \dots i_k) \sigma^{-1}(\sigma(t_j)) = \sigma \circ (i_1 \dots i_k) \sigma(i_{l+1 \bmod m})$ , где  $\bmod m$  - почти модуль (вместо 0 будет  $m$ ).  $\square$

**Def 43.** Отношение на группе  $G$  :

$$x \sim_c y \Leftrightarrow \exists z : x = y^z.$$

$$x = y^z \wedge y = ab \Rightarrow x = (a^b)^z = a^{bz}.$$

Класс эквивалентности " $\sim_c$ " - класс сопряженных элементов.

**Theorem 2.6.1.** Класс сопряженных элементов в  $S_n$  состоит из всех перестановок фиксированного циклического типа.

*Proof.* Следует из леммы 2.6.1  $\square$

**Ex.** Рассмотрим группу  $S_4$  и перестановки циклического типа  $2 + 2$ :

$$\begin{aligned} & (12)(34) \\ & (13)(24) \\ & (14)(32) \end{aligned}$$

$$\sigma(12)(34)\sigma^{-1} = (\sigma(1)\sigma(2))(\sigma(3)\sigma(4))$$

Еще есть нейтральный класс  $e$  и 2, 3, 4. Двумерная группа Клейна

$$K_4 = \{e, (12)(34), (13)(24), (14)(23)\}.$$

- единственная нормальная подгруппа в  $S_n$  для любого  $n$ , индекс которой более 2.

*Practice.* Найти  $S_4/K_4$ . Там 6 элементов.

**Statement.**  $\text{ord}(ab) \mid \text{НОК}(\text{ord}(a), \text{ord}(b))$ .

Порядок перестановки равен НОКу порядков независимых циклов.

## 2.7 Лекция 21

### 2.7.1 Продолжаем возиться с перестановками. Четность.

**Def 44** (Инверсия).  $\sigma \in S_n$ .

Инверсия в  $\sigma$  - пара  $(i, j) : i < j \wedge \sigma(i) > \sigma(j)$ .

**Ex.** Четыре инверсии:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 1 \end{pmatrix}.$$

**Def 45** (Четность перестановки).

$$\varepsilon : S_n \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}.$$

$\sigma \mapsto$  количество инверсий по модулю 2.

**Def 46.** Транспозиция – цикл длины 2.

$$\tau(i) = \tau(j), \tau(j) = \tau(i), \tau(k) = k.$$

**Lemma.** Любая перестановка  $\sigma$  раскладывается в произведении транспозиций соседних индексов.

$$S_n = \langle (12), (23) \dots (n-1 \ n) \rangle.$$

*Proof.* Индукция по количеству инверсий  $I$  в  $\sigma \in S_n$ .

База:  $I = 0$  Это  $\sigma = id$ .

Переход:  $I > 0$ . Заметим, что

$$\exists i : \sigma(i) > \sigma(i+1).$$

Тогда рассмотрим  $\tau = \sigma \circ (i, i+1)$ .

$$\tau(i) = \sigma(i+1) < \tau(i+1) = \sigma(i).$$

Так как  $\tau(k) = \sigma(k) \quad \forall k \notin \{i, i+1\}$ , количество инверсий стало на одну меньше, чем количество инверсий в  $\sigma$ . Теперь по предположению индукции полученная перестановка раскладывается, а тогда и  $\sigma$  раскладывается.  $\square$

**Lemma.**  $\tau = \sigma(i \ i+1) \Rightarrow |I(\tau) - I(\sigma)| = 1$

**Lemma.** Если  $\sigma = \tau_1 \cdot \tau_2 \dots \tau_k$ ,  $\forall i : \tau_i$  - транспозиция соседних индексов, то

$$\varepsilon(\sigma) = k \mod 2.$$

**Theorem 2.7.1.**  $\varepsilon : S_n \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$  - гомоморфизм группы.

*Proof.*

$$\begin{aligned} \sigma &= \tau_1 \cdot \dots \tau_k \\ \rho &= \tau_{k+1} \cdot \dots \tau_n \quad \forall i : \tau_i = (j \ j+1). \\ \sigma \cdot \rho &= \tau_1 \cdot \dots \tau_n \end{aligned}$$

Проверим требуемые свойства:

$$\varepsilon = k \mod 2, \quad \varepsilon(\rho) = n - k \mod 2$$

$$\varepsilon(\sigma\rho) = m \mod 2 = \varepsilon(\sigma) + \varepsilon(\rho) \mod 2$$

$$\varepsilon(\rho^{-1}\sigma\rho) = -\varepsilon(\rho) + \varepsilon(\sigma) + \varepsilon(\rho)$$

$$\varepsilon((i_1, \dots i_k)) = \varepsilon((1, \dots k)) = k - 1 \mod 2 \quad \square$$

Рассмотрим кольцо  $(\mathbb{Z}_n, +_n, \cdot_n)$ .  $\mathbb{Z}_n^*$  - множество обратимых элементов.

$x \in \mathbb{Z}_n$  - обратимо тогда и только тогда, когда  $\gcd(x, n) = 1$ .

$\varphi|\mathbb{Z}_n^*|$  - количество чисел от 1 до  $n-1$  взаимно простых с  $n$ . Из теоремы Лагранжа очевидно следует, что:

$$x^{\varphi(n)} \mod n = 1.$$

**Statement.**  $A$  – абелева группа.  $a, b \in A$ ,  $\text{ord}(a) = m$ ,  $\text{ord}(b) = n$ ,  $h = \text{lcm}(m, n)$

$$(ab)^k = a^k b^k = (a^m)^x (b^n)^y = 1.$$

Тогда  $\text{ord}(ab) \mid k$ .

**Lemma.**  $\langle a \rangle \cap \langle b \rangle = \{1\} \Rightarrow \text{ord}(ab) = \text{lcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b))$

*Proof.*

$$(ab)^l = 1 \Rightarrow \underbrace{a^l}_{\in \langle b \rangle} = \underbrace{b^{-l}}_{\in \langle b \rangle} = 1.$$

Тогда

$$\left. \begin{array}{l} \text{ord}(a) \mid l \\ \text{ord}(b) \mid l \end{array} \right\} \Rightarrow \text{lcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b)) \mid l.$$

□

**Corollary.**

$$a \in A, b \in B, \quad A, B \leq A \times B.$$

Тогда  $\text{ord}(ab) = \text{lcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b))$

**Corollary.**

$$\text{lcd}(\text{ord}(a), \text{ord}(b)) = 1.$$

Тогда  $\text{ord}(ab) = \text{lcm}(\text{ord}(a), \text{ord}(b))$

*Proof.*  $|\langle a \rangle \cap \langle b \rangle| = h$

$$h \mid |\langle a \rangle| \wedge h \mid |\langle b \rangle| \Rightarrow h \mid \gcd(\text{ord}(a), \text{ord}(b)) = 1 \Rightarrow h = 1.$$

Следовательно,  $\langle a \rangle \cap \langle b \rangle = \{1\}$ .

□

**Corollary.** Порядок перестановки равен наибольшему общему делителю порядков независимых циклов, в произведение которых она раскладывается.

**Def 47** (Экспонента (показатель)).  $\exp(A)$  – наименьшее натуральное число, такое что  $a^n = 1 \quad \forall a \in A$ .

**Lemma.**  $\exp(A) = \text{lcm}_{a \in A}(\text{ord}(a))$

**Theorem 2.7.2.**  $A$  – абелева группа.  $\exp(A) < \infty$ .

Тогда  $\exists a \in A : \text{ord}(a) = \exp(A)$

*Proof.* Разложим экспоненту на простые множители:

$$\exp A = p_1^{k_1} \cdot \dots \cdot p_m^{k_m}, \quad \forall i \in [1, m] : p_i \in \mathbb{P}, k_i \in \mathbb{NN}.$$

Так как  $\exp(A) = \text{lcm}_{x \in A}(\text{ord} x)$ , существует  $\forall i \in [1, m] x_i : p_i^{k_i} \mid \text{ord}(x_i)$ .

$$\text{ord} x_i - p_i^{k_i} \cdot n_i = \text{ord}(x_i^{n_i}) = p_i k_i.$$

Так как порядки всех  $x_i^{n_i}$  взаимно просты, то

$$\text{ord}\left(\prod_{i=1}^m x_i^{n_i}\right) = \prod_{i=1}^m \text{ord}(x_i^{n_i}) = \prod_{i=1}^m p_i^{k_i} = \exp(A).$$

□

## 2.8 Лекция 22

**Statement.**  $\varphi : G \rightarrow h$ -гомоморфизм.  $g \in G$ . Тогда  $\text{ord}(\varphi(g)) \mid \text{ord} g$ .

*Proof.* Рассмотрим сужение  $\tilde{\varphi} : \langle g \rangle \rightarrow \varphi(\langle g \rangle) = \langle \varphi(g) \rangle$ .

$$\langle \varphi(g) \rangle \cong \langle g \rangle / \text{Ker} \tilde{\varphi}.$$

$$\text{ord} \varphi(g) = |\langle \varphi(g) \rangle| = \frac{|\langle g \rangle|}{|\text{Ker} \tilde{\varphi}|}.$$

*Note.* Можно использовать одну из доказанных лемм, тогда решение будет проще. □

**Theorem 2.8.1.**  $p \in \mathbb{P}$

$(\mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z})^*$  - циклическая, если  $p \neq 2$  или  $k \leq 2$ . Иначе  $(\mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z})^* \cong C_2 \times C_{2^{k-2}}$

*Proof.* Обозначим  $G = \mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z}$

$$|(\mathbb{Z}/p^k\mathbb{Z})^*| = p^k - p^{k-1} = p^{k-1}(p-1).$$

Рассмотрим множество чисел вида  $1+px$ . Они не делятся на  $p$ . Чтобы эти числа были меньше  $|G^*|$ , ограничим  $x$ .

$$H = \{1+px \mid x \in \{0, \dots, p^{k-1}-1\}\}.$$

**Statement.**  $H$  - подгруппа.

$$(1+px)(1+py) = 1+pz \in H.$$

Если

$$(1+px)(1+py) \equiv 1 \pmod{p^k}.$$

$$a+apx+py+p^2xy \equiv 1 \pmod{p^k}.$$

Следовательно,  $a = 1+pz$ . Обратный элемент:

$$(1+px)^{-1} = (1+pz+py) \in H.$$

$$|H| = p^{k-1}, |G/H| = p-1 \text{ - циклическая (докажем позже).}$$

$$\exists b \in G : \text{ord}(bH) = p-1, \quad \pi(b) = bH, \pi : G \rightarrow G/H.$$

То есть  $p-1 \mid \text{ord} b$ . Получаем  $\exists l \in \mathbb{N} : \text{ord} b^l = p-1$ . (или можно сказать,  $p-1 \mid \exp(G)$ ).

По следствию из теоремы Лагранжа  $|H| \cdot p \cdot p^{k-1} \wedge 1+p \in H \Rightarrow (1+p)^{p^{k-1}} \equiv 1 \pmod{p^k}$ .  
Тогда  $\text{ord}(1+p) \mid p^{k-1}$ .

Осталось доказать, что

$$(1+p)^{p^{k-2}} \not\equiv 1 \pmod{p^k}.$$

Будем доказывать по индукции. Для  $k = 2$  - очевидно. При  $k > 2$  :

$$(1+p)^{p^{k-3}} = 1 + p^n x, \quad p \nmid p.$$

По предположению индукции  $1 \leq n < k - 1$ .

$$(1+p)^{p^{k-2}} = \left((1+p)^{p^{k-3}}\right)^p = (1+p^n x)^p = 1 + p \cdot p^n + \sum_{i=2}^p C_p^i p^{ni} x^i \equiv 1 + p^{n+1} x + p^{n+2} y \pmod{p^{n+2}},$$

так как

$$(1+p)^{p^{k-2}} = 1 + p^{n+1} \underbrace{(x + py)}_{\text{не делится на } p}.$$

$$n+1 < k \Rightarrow p^k \nmid (1+p)^{p^{k-2}} - 1$$

*Remark.*

$$C_p^i = \frac{p(p-1)!}{(p-1)! i!} \vdots p.$$

*Remark.* Если  $p = 2$ , то при  $i = 2, n = 1$

$$C_p^i = 1 \Rightarrow C_p^i p^2 \not\vdots p^3.$$

Поэтому для  $p = 2$  эти рассуждения не работают.

Теперь разберем случай  $p = 2$ .

$$|G| = 2^{k-1}, k \geq 3.$$

1. Любой элемент имеет порядок не более  $2^{k-1}$ , то есть  $(1+2x)^{2^{k-2}} \equiv 1 \pmod{2^k}$ .

Индукция по  $k$ . База  $k = 3$ .

$$(1+2x)^2 = 1 + 4x + 4x^2 = 1 + 4x(x+1) \equiv 1 \pmod{2^3},$$

так как либо  $x$ , либо  $x+1$  четное.

Переход. По индукционному предположению

$$(1+2x)^{2^{k-3}} = 1 + 2^{k-1} y.$$

Дальше

$$(1+2x)^{2^{k-2}} = (1+2^{k-1} y)^2 = 1 + 2^k y + 2^{2k-2} y^2 \equiv 1 \pmod{2^k}.$$

Доказано.

$ord_G 5 = 2^{k-2}$ , то есть

$$5^{2^{k-3}} \not\equiv 1 \pmod{2^k}.$$

Индукция по  $k$ . База  $k = 3$ .

$$5 \not\equiv 1 \pmod{8}.$$

Переход: по индукционному предположению

$$5^{2^{k-4}} \not\equiv 1 \pmod{2^{k-1}}.$$

$$5^{2^{k-1}} = 1 + 2^n z, \quad 1 < n < k-1, \quad 2 \nmid z.$$

*Remark.*  $n > 1$ , так как  $5 \equiv 1 \pmod{2^2}$

Тогда

$$\begin{aligned} 5^{2^{k-3}} &= (1 + 2^n \cdot z)^2 = 1 + 2 \cdot 2^n \cdot z + 2^{2n} \cdot z^2 = \\ &= 1 + 2^{n+1}(z + z^2 \cdot 2^{n-1}) \not\equiv 1 \pmod{2^{n+2}}. \end{aligned}$$

□

## 2.9 Лекция 23

### 2.9.1 Теорема о гомоморфизме для колец

*Note.* Воспоминания  $R, R'$  – кольца с 1 (не обязательно коммутативные).

$\varphi : R \rightarrow R'$  – гомоморфизм, если

$$\begin{aligned} \varphi(r + s) &= \varphi(r) + \varphi(s) \\ \varphi(r \cdot s) &= \varphi(r) \cdot \varphi(s) \\ \varphi(1) &= 1 \end{aligned}$$

$$Im \varphi = \{\varphi(r) \mid r \in R\} \text{ – подкольцо в } R'.$$

$$Ker \varphi = \{r \mid \varphi(r) = 0\} \text{ – аддитивная подгруппа в } R.$$

**Def 48.**  $I$  – аддитивная подгруппа в  $R$ .  $I$  называется двусторонним (правым, левым) идеалом в  $R$  тогда и только тогда, когда

$$\forall a \in R, t \in I : at, ra \in I \quad (\text{соответственно для правого и левого } ra \in I, at \in I).$$

**Lemma.**  $Ker \varphi$  – двусторонний идеал.

**Def 49.**  $I$  – двусторонний идеал,  $R$  – кольцо. Аддитивная факторгруппа  $R/I$  является кольцом относительно операции  $(r + I)(s + I) = rs + I$

*Proof.* Если  $x, y \in I$  :  $(r + x)(s + y) = rs + \underbrace{xs + sy + xy}_{\in I} \in rs + I$  □

**Ex.**  $2\mathbb{Z} \leq \mathbb{Z}$

$$4\mathbb{Z} \stackrel{\text{как множества}}{=} (0 + 2\mathbb{Z}) \cdot (0 + 2\mathbb{Z}) \stackrel{def}{=} 0 + 2\mathbb{Z}.$$

**Designation.**  $\pi : R \rightarrow R/I \quad \pi(r) = r + I$

**Theorem 2.9.1.** Универсальное свойство  $I$  – идеал в  $R$ .  $\varphi R \rightarrow R', \quad I \subseteq \text{Ker} \varphi \Rightarrow \exists! \psi : R/I \rightarrow R' :$

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\varphi} & R' \\ \downarrow \pi & \nearrow \psi & \\ R/I & & \end{array}$$

– коммутативна.  $\text{Ker} \varphi = I \Rightarrow \psi$  – инъективна.  $\varphi$  – сюръективна  $\Rightarrow \phi$  – сюръективна.

*Note.* Далее считаем кольца коммутативными.

**Def 50.**  $X \subseteq R$  – кольцо. Идеал, порожденный  $X$  – наименьший идеал, содержащий  $X$ . Он равен

$$\left\{ \sum_{i=1}^n a_i x_i \mid a_i \in R, x_i \in X, n \in \mathbb{N} \right\}.$$

Обозначается:  $\sum_{x \in X} xR = \langle X \rangle_R$

$xR = (x)$  – главный идеал, порожденный  $x$ .

**Ех.** В  $\mathbb{Z}$  любой идеал главный.

$$I \subseteq \mathbb{Z},$$

$$0 < r < I, \quad r \leq |s| \forall s \in I.$$

Рассмотрим  $x \in I$ .

$$x = rs + y, \quad 0 \leq y < r.$$

$$y = x - rs \in I.$$

Так как  $r$  – наименьший, то  $y = 0$ .

**Ех.**

$$\mathbb{Z}[\sqrt{-1}] = \{a + b\sqrt{-3} \mid a, b \in \mathbb{Z}\}.$$

$$(1 + \sqrt{-3})(1 - \sqrt{-3}) = 2 \cdot 2.$$

Идеал, порожденный  $1 + \sqrt{-3}$  и  $2$  ( $(1 + \sqrt{-3})R + 2R$ ), не является главным идеалом.

## 2.9.2 Комплексные числа

$$\mathbb{C} = \mathbb{R}[x]/(x^2 + 1)$$

$$i := x + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x].$$

$$i^2 + 1 = x^2 + 1 + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x] = 0_{\mathbb{C}} \Rightarrow i^2 = -1.$$

$\mathbb{R} \hookrightarrow \mathbb{R}[x] \rightarrow \mathbb{C}$  – инъективное отображение. Отождествляем  $r \in R \longleftrightarrow r + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x]$  и считаем, что  $\mathbb{R} = \mathbb{C}$ .

$$p \in \mathbb{R}[x]$$

$$p = (x^2 + 1) \cdot f + (a + bx) \in a + bx + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x].$$

$$p + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x] = a + bi.$$

Таким образом

$$(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i.$$

$$(a + bi)(c + di) = ac - bd + i(ad + bc).$$

$$\overline{a + bi} = a - bi$$

$$\forall w, z \in \mathbb{C} :$$

$$\begin{aligned}\overline{z \cdot w} &= \bar{z} \cdot \bar{w} \\ \overline{z + w} &= \bar{z} + \bar{w} \\ \overline{\bar{z}} &= z\end{aligned}$$

$\bar{\phantom{x}} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  - автоморфизм.

$$a = \operatorname{Re} z, \quad b = \operatorname{Im} z$$

$\mathbb{C}$  - векторное пространство над  $\mathbb{R}$  с базисом  $\{1, i\}$

## 2.10 Лекция 24

### 2.10.1 Окончание комплексных чисел

$$\mathbb{C} := \mathbb{R}[x] / (x^2 + 1).$$

$$i := x + (x^2 + 1)\mathbb{R}[x]$$

Любое комплексное число представляется в виде  $a + bi$ ,  $a, b \in \mathbb{R}$ , сопряжение:  $\overline{a + bi} = a - bi$ . Умножение на сопряженное:  $(a + bi)(a - bi) = a^2 + b^2$ . Сложение с сопряженным:  $(a + bi) + (a - bi) = 2a$ . Получили, что  $z \cdot \bar{z}, z + \bar{z} \in \mathbb{R}$ .

**Statement.** *Существует ровно два автоморфизма на комплексных числах, оставляющие вещественные на месте.*

*Proof.*  $f \in \mathbb{R}[x]$ .

$$f(\varphi(i)) = \varphi(f(i)), \quad \alpha \in \mathbb{C}$$

так как  $\varphi(\alpha^2) = \varphi(\alpha)^2$

$\varphi(a\alpha^n) = a\varphi(\alpha)^n, a \in \mathbb{R}$ . Если  $f(x) = x^2 + 1$ ,  $f(i) = 0$ .  $f(\varphi(i)) = \varphi(f(i))$ , то есть корень переходит в корень. Значит, нетривиальный только один. А второй — тривиальный.  $\square$

$$|z| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{z \cdot \bar{z}}.$$

$$\operatorname{Arg} z := \alpha \in \mathbb{R} / 2\pi\mathbb{Z}.$$

Можно выразить через аргумент:

$$a = |z| \cdot \cos \alpha$$

$$b = |z| \cdot \sin \alpha$$

$$z = |z| \cdot (\cos \alpha + i \sin \alpha) - \text{тригонометрическая формула}$$

$$\operatorname{Arg} z = \begin{cases} \arctg \frac{b}{a} + 2\pi\mathbb{Z}, & a > 0 \\ \pi + \arctg \frac{b}{a} + 2\pi\mathbb{Z}, & a < 0 \\ \frac{\pi}{2} \cdot \operatorname{sign}(b), & a = 0 \end{cases}.$$



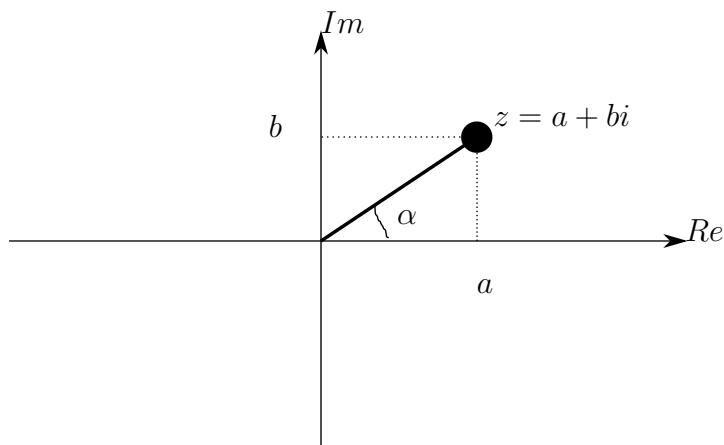


Figure 2.1: Комплексное число на плоскости

**Statement.**

$$(\cos \alpha + i \sin \alpha)(\cos \beta + i \sin \beta) = \cos(\alpha + \beta) + i \sin(\alpha + \beta).$$

**Statement.**  $\varepsilon : \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{C}^*$ ,  $\varepsilon(\alpha) = \cos \alpha + i \sin \alpha$  – это гомоморфизм.

$$\text{Im} \varepsilon = S^1 := \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}.$$

Так же:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\alpha + \beta) &= \varepsilon(\alpha)\varepsilon(\beta) \\ \varepsilon(-\alpha) &= \varepsilon(\alpha)^{-1} \\ \varepsilon(\beta - \alpha) &= \frac{\varepsilon(\alpha)}{\varepsilon(\beta)} \\ \varepsilon(n\alpha) &= \varepsilon(\alpha)^n, \quad n \in \mathbb{Z} \\ (\cos \alpha + i \sin \alpha)^n &= \cos n\alpha + i \sin n\alpha - \text{формула Муавра} \end{aligned}$$

### Несколько слов о комплекснопеременных функциях

**Def 51.** Дифференциал:

$$f(x + \delta x) = f(x) + df(\delta x) + \overline{o(\delta x)}.$$

В случае дифференцирования функции от двух переменных,  $x$  – столбец, а  $df$  – матрица  $2 \times 2$ .

*Note.* Для комплексных коэффициентов: умножение на  $\lambda + \mu i \rightarrow \begin{pmatrix} \lambda & -\mu \\ \mu & \lambda \end{pmatrix}$

**Statement.** Напишем степенные ряды для тригонометрических функций:

$$\begin{aligned} e^t &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \\ \cos t &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{2k}}{(2k)!} \cdot (-1)^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha^{2k}}{(2k)!} \\ \sin t &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{2k+1}}{(2k+1)!} \cdot (-1)^k = i \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha^{2k+1}}{(2k+1)!} \\ e^{i\alpha} &= \sum_{n=2k} \frac{(i\alpha)^{2k}}{(2k)!} + \sum_{n=2k+1} \frac{(i\alpha)^{2k+1}}{(2k+1)!} \\ e^{i\alpha} &:= \cos \alpha + i \sin \alpha. \\ \varepsilon(\alpha) &= e^{i\alpha} \end{aligned}$$

*Note* (Показательная форма комплексного числа).

$$z = |z| \cdot e^{i \cdot \text{Arg} z}$$

$$e^{2\pi i} = \cos 2\pi + i \sin 2\pi = 1.$$

$2\pi$  – период для экспоненты.

$$e^{\alpha+2\pi i} = e^{\alpha}.$$

$$a, b \in \mathbb{R} : e^{a+bi} = e^a e^{bi} = e^{a(\cos b + i \sin a)}.$$

На языке теории групп:

$$r \in \mathbb{R}_{>0}^*, \alpha \in \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z} : (r, \alpha) \mapsto r \cdot e^{i\alpha}.$$

То есть  $\mathbb{R}_{>0}^* \times \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{C}^*$  – изоморфизм.

$$\mathbb{C}^* \cong \underbrace{\mathbb{R}_{>0}^* \times \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}}_{\ln} \cong \mathbb{R} \times \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z} \cong \mathbb{C}/2\pi\mathbb{Z}.$$

$$Ln : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}/3\pi\mathbb{Z}.$$

$$Ln : (r, e^{i\alpha+2\pi\mathbb{Z}} = \ln r + i(\alpha + 2\pi\mathbb{Z}) = \ln r + i\alpha + 2\pi\mathbb{Z}.$$

**Statement** (вычисление корня  $n$ -й степени). Вычисление корня в аддитивной группе  $\mathbb{C}/2\pi\mathbb{Z}$  – решение уравнения:

$$\begin{aligned} xn &= 0 \mod 2\pi i\mathbb{Z} \\ xn &= 2\pi i n, k \in \mathbb{Z} \\ x &= \frac{2\pi i k}{n} \mod 2\pi i\mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \end{aligned}$$

$$z^n = 1, \quad z = Ln z, \text{ далее}$$

$$nx = 0 \mid 2\pi i\mathbb{Z}.$$

$$z = e^x = e^{\frac{2\pi i k}{n}}.$$

## 2.11 Лекция 25

$$z^n \iff z = e^{\frac{2\pi i k}{n}}, k \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}.$$

$$\Theta_n(Z) = z^k - \text{гомеоморфизм } \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^*.$$

$$\mu_n = \text{Ker} \Theta_n = \{e^{\frac{2\pi i k}{n}} \mid k \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}\}.$$

Эти числа делят окружность на  $n$  равных частей.

$$\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \rightarrow \mu_n$$

$$k + n\mathbb{Z} \mapsto e^{\frac{2\pi i k}{n}} - \text{изоморфизм}.$$

**Def 52.** Образующие элементы  $\mu_n$  называются преобразными корнями из 1.

**Corollary.**  $e^{\frac{2\pi i k}{n}}$  – преобразный корень тогда и только тогда, когда  $\gcd(k, n) = 1$ .

**Statement.**  $z^n = w = re^{i\varphi}$ . Одно из решений этого уравнения:  $\left(\sqrt[n]{r} \cdot e^{\frac{i\varphi}{n}}\right)^n$ .

А все решения можно записать:

$$\sqrt[n]{w} = \{\sqrt[n]{r} \cdot e^{i\frac{\varphi + 2\pi k}{n}} \mid k \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}\}, \quad z^n = w.$$

**Theorem 2.11.1** (Основная теорема алгебры).  $p \in \mathbb{C}[x]$ ,  $\deg p \geq 1$

Тогда  $\exists \alpha \in \mathbb{C} : p(\alpha) = 0$ .

**Theorem 2.11.2** (Лиувилль). Любая ограниченная дифференцируемая функция  $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$  – константа.

### 2.11.1 Кольца главных идеалов

**Евклидовы кольца**

**Def 53.** Область целостности – коммутативное кольцо с единицей без делителей нуля.

**Designation.**  $R$  – коммутативное кольцо с 1 без делителей нуля.

**Def 54.**  $f : R \rightarrow \mathbb{N}_0 \cup \{-\infty\}$  Обладает свойствами:

1.  $f(0) < f(r), \quad \forall r \in R$
2.  $\forall a, b \in R, b \neq 0 \exists c, r \in R : a = bc + r \wedge f(r) < f(b)$

Тогда  $R$  – евклидова кольцо с евклидовой нормой  $f$ .

**Theorem 2.11.3.** Любой идеал евклидова кольца главный.

*Proof.* Пусть  $I \triangleleft R$ .

$$a \in I \setminus \{0\} : f(a) \leq f(b) \quad \forall b \in I \setminus \{0\}.$$

$$b = ac + r, \quad f(r) < f(a).$$

$$r = \underbrace{b}_{\in I} - \underbrace{ac}_{\in I} \in I.$$

Если  $r \neq 0$ , то  $f(a) \leq f(r) < f(a)$ . Противоречие. □

*Note.* На практике ищется с помощью алгоритма Евклида.

**Statement.**  $b = ac + r_1$

$$a = r_1c_1 + r_2$$

$$r_1 = r_2c_2 + r_3$$

$\vdots$

$$f(r_{i+1}) < f(r_i)$$

$\vdots$

$$f(r_n) \leq f(d) \quad \forall d \in I \quad aR + bR = r_nR$$

**Statement.**  $R$  – область главных идеалов.  $a_i \in R$

$$\sum_{i=1}^m a_i R = dR.$$

Тогда  $d := \gcd(a_i)$ .

	Кольцо	Норма
<b>Exs.</b>	$\mathbb{Z}$	$ \cdot $
	$F[x]$ , $F$ – поле	$\deg$
	Гауссовы целые числа: $\mathbb{Z}[i] = \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$	$ \cdot $

**Ex** (не евклидово число).  $\mathbb{Z}[\sqrt{19}]$  – не евклидово кольцо главных идеалов.

## 2.11.2 Китайская теорема об остатках

**Theorem 2.11.4.** КТО для целых чисел  $x \equiv x_1 \pmod{n_1}$

$$x \equiv x_2 \pmod{n_2}$$

$\vdots$

$$x \equiv x_m \pmod{n_m}$$

Существует единственное  $x$  по модулю произведения  $n_1 \dots n_m$ , удовлетворяющее данным сравнениям.

**Theorem 2.11.5.** КТО  $R$  – коммутативное кольцо с 1.  $I_1, \dots, I_m$  – идеалы в  $R$ .

$I_i + I_k = R \quad \forall j \neq k$ . Тогда

$$R/I_1 \oplus \dots \oplus R/I_m \cong R/I_1 \dots I_m.$$

*Remark.*  $A, B$  – кольца. Декартово произведение

$$A \oplus B = a \times B.$$

с покомпонентными операциями.

$$(a_1, b_1) + \cdot (a_2, b_2) = (a_1 + \cdot a_2, b_1 + \cdot b_2).$$

**Statement.** Идеалы  $I, J$  взаимно простые, если  $I + J = R$ .

*Proof.*  $I \cap J$  – идеал.  $I + J = \{a + b \mid a \in I, b \in J\}$  – идеал.  $I \cdot J = \left\{ \sum_{i=1}^m a_i b_i \mid m \in \mathbb{N}, a_i \in I, b_i \in J \right\}$  □

**Lemma.**  $I \cdot J \subseteq I \cap J$  верно всегда.

**Lemma.**  $I + J = R \implies I \cdot J = I \cap J$

*Proof.*  $I \cap J = (I \cap J) \cdot R = (I \cap J)(I + J) = \underbrace{(I \cap J) \cdot I}_{\in I \cdot J} + \underbrace{(I \cap J) \cdot J}_{\in I \cdot J} \subseteq I \cdot J$  □

## 2.12 Лекция 26

$I, J$  – идеалы в  $R$

$I + J = R \Leftrightarrow I, J$  взаимно простые.

**Lemma.**  $I + J = R$ . Тогда

$$R/IJ \cong R/I \oplus R/J.$$

*Proof.*

$$\varphi : R \rightarrow R/I \oplus R/J.$$

$$r \mapsto (r + I, r + J).$$

$$\text{Ker} \varphi \ni r \Leftrightarrow \begin{cases} r + I = I \\ r + J = J \end{cases} \Leftrightarrow r \in I \cap J$$

$$\text{Ker} \varphi = I \cdot J.$$

$$\exists a \in I, b \in J : a + b = 1.$$

$$r = br_1 + ar_2 \equiv r_1 \pmod{I}.$$

$$r = br_1 + ar_2 \equiv r_2 \pmod{J}.$$

То есть  $\varphi(r) = (r_1 + I, r_2 + J)$ , следовательно,  $\varphi$  – сюръективно.

По теореме о гомоморфизме колец

$$R/IJ \cong R/I \oplus R/J.$$

□

**Lemma.**  $J, I_1, \dots, I_n$  – идеалы в  $R$ .

$$J + I_n = R \forall k \implies J + I_1 \cdot \dots \cdot I_n = R.$$

*Proof.* Индукция. База для  $k = 1$ . Очевидно. Переход:

По предположению индукции  $J + \underbrace{I_1 + \dots + I_{n-1}}_I = R$ . Нужно доказать, что  $J + I \cdot I_n = R$ .

$$\begin{aligned} R &= J + I \cdot R = J + I(J + I_n) = \\ &= J + IJ + II_n = J + II_n \end{aligned} \quad .$$

□

**Theorem 2.12.1** (Китайская теорема об остатках).  $I_1, \dots, I_n$  – попарно взаимнопростые идеалы, то есть  $\forall j \neq k : I_j + I_k = R$ . Тогда

$$\frac{R}{I_1 \cdot \dots \cdot I_n} \cong \frac{R}{I} \oplus \dots \oplus \frac{R}{I_n}.$$

*Note.* Здесь дробью обозначается фактор кольцо.

*Proof.* Индукция по  $n$ . Так как  $I_k$  взаимно просто с  $I_1 \cdot \dots \cdot I_{n-1}$

$$\frac{R}{I_1 \cdot \dots \cdot I_n} \cong \frac{R}{I_1 \cdot \dots \cdot I_{n-1}} \oplus \frac{R}{I_n}.$$

Дальше по предположению индукции получаем то, что хотим. □

**Statement.**  $x \equiv x_k \pmod{I_k}, \quad k = 1, \dots, n$  равносильно тому, что

$$x \equiv \sum_{k=1}^n x_k c_k \pmod{I_1 \cdot \dots \cdot I_n}, \quad c_k \in \prod_{j \neq k} I_j \cap (1 + I_k).$$

*Note.* В целых числах:

$$x \equiv x_k \pmod{m_k}, \quad k = 1, \dots, n.$$

Чтобы найти  $c_k$ , нужно решить диофантово уравнение:

$$y \cdot m_k + z \cdot \underbrace{\prod_{j \neq k} m_j}_{=c_k} = 1.$$

**Statement** (применение КТО). В  $F[t]$  :

$$p(x_k) = y_k \quad \forall k = 1, \dots, n, x_i \neq x_k \quad \forall i \neq k$$

равносильно

$$\begin{aligned} p &\equiv y_k \pmod{(t - x_k)}. \\ p(t) &\equiv \sum_{k=1}^n y_k \prod_{i \neq k} \frac{t - x_i}{x_k - x_i} \pmod{(t - x_1) \cdot \dots \cdot (t - x_n)}. \end{aligned}$$

### 2.12.1 Простые и максимальные идеалы

Все кольца будут коммутативные с единицей.

**Def 55.** Простой идеал  $P \neq R$  кольца  $R$  называется простым, если  $ab \in P \Rightarrow a \in P \vee b \in P$

*Note.* Другими словами  $R \setminus P$  замкнуто относительно умножения

**Ех.** В  $\mathbb{Z}$  идеал  $n\mathbb{Z}$  – простой тогда и только тогда, когда  $n$  – простое.

**Ех.** В  $F[t]$  идеал  $f \cdot F[t]$  простой тогда и только тогда, когда  $f$  – неприводимый многочлен.

**Ех.** Однако в  $\mathbb{Z}[\sqrt{-3}] = R$  идеал  $2R$  – не простой, хотя 2 не приводимо.

$$(1 + \sqrt{-3})(1 - \sqrt{-3}) = 4 \in 2R.$$

Докажем, что элементы  $2, 1 \pm \sqrt{-3}$  неприводимы. Обозначим их за  $\alpha = \beta\gamma$ . Квадраты равны 4.

$$|\alpha|^2 = 4 = |\beta|^2 \cdot |\gamma|^2.$$

$$|a + b\sqrt{-3}|^2 = a^2 + 3b^2, \quad a, b \in \mathbb{Z}.$$

Либо  $|\beta|^2 = 1$ , либо  $|\gamma|^2 = 1$ , то есть  $\beta$  или  $\gamma$  обратимы.

**Ех.**  $F[x, y] = R$

$$I = xR + yR.$$

– простой.

**Def 56.** Максимальны идеал – максимальный собственный идеал. Что равносильно тому, что это максимальный из идеалов, не содержащих единицу.

*Note.* Другими словами,  $M$  – максимальный идеал, если  $M \neq R$  и  $M \subseteq I \subset R \Rightarrow I = M$

**Theorem 2.12.2.** Любой собственный идеал содержится в каком-то максимальном.

*Proof.*  $J \subseteq R$ .

$\mathcal{X}$  – множество всех идеалов, содержащих  $J$  и не содержащих единицу.

$\mathcal{Y}$  – линейно упорядоченное подмножество  $\mathcal{X}$ , то  $\bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I \in \mathcal{X}$

$$a, b \in \bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I \Rightarrow \exists I_1, I_2 \in \mathcal{Y} : a \in I_1, b \in I_2 \wedge (I_1 \subseteq I_2 \vee I_2 \subseteq I_1),$$

так как  $\mathcal{Y}$  – линейно упорядочено.

$$a, b \in I_k \quad (k = 1, 2) : a + b \in I_k \subseteq \bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I.$$

$$a \in \bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I \Rightarrow ra \in \bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I, r \in R.$$

Следовательно,  $\bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I$  – идеал.

$$\bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I \subseteq J \wedge \bigcup_{I \in \mathcal{Y}} I \not\subseteq 1.$$

По лемме Цорна  $\mathcal{X}$  содержит максимальный элемент. Пусть это  $M$ . Если  $M \subset N \subset R$ ,  $N \in \mathcal{X} \Rightarrow N = M$  □